Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Química

Planta de Incineración de Residuos Sólidos Urbanos a partir de una Tecnología de Parrilla

Autor: Santiago López Camacho
Tutor: Carlos Leiva Fernández

Dpto. Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Química

Planta de Incineración de Residuos Sólidos Urbanos a partir de una Tecnología de Parrilla

Autor:
Santiago López Camacho

Tutor:
Carlos Leiva Fernández
Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Química y Ambienta
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Proyecto Fin de Carrera: Planta de Incineración de Residuos Sólidos Urbanos a partir de una Tecnología de Parrilla

Autor: Santiago López Camacho

Tutor: Carlos Leiva Fernández

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

.

En primer lugar, quiero mostrar mi gratitud a todas aquellas personas que estuvieron presentes en la realización de este proyecto, de esta meta de mi vida que es tan importante para mí, agradecer todas sus ayudas, sus palabras motivadoras, sus conocimientos, sus consejos y su dedicación.

Muestro mis más sinceros agradecimientos a mi tutor de este Trabajo de Fin de Máster, Carlos, quien con sus conocimientos y sus consejos fue una pieza clave para su posible realización.

A mis amigos, quienes a través del tiempo fuimos creando una familia, muchas gracias por toda su colaboración, por convivir todo este tiempo conmigo, por compartir experiencias, alegrías, frustraciones, llantos, tristezas, peleas, celebraciones y múltiples factores que ayudaron a aportarme confianza, muchas gracias.

Por último, quiero agradecer a la base de todo, a mi familia, en especial a mis padres, y a mi pareja, que quienes con sus consejos fueron mi constante motivación y mi principal guía para no desviarme del camino correcto, muchas gracias por su paciencia y comprensión, y sobre todo por su amor.

¡Muchas gracias!

Resumen

En este proyecto se estudia principalmente cuales son las mejores técnicas disponibles que se pueden aplicar para la concepción de una planta de incineración, según unos residuos tratados disponibles concretos.

Se valoran las diferentes técnicas y tecnologías expuestas en el documento BREF para las mejores técnicas disponibles en Incineración, y se seleccionan las más adecuadas, según criterios establecidos en este mismo documento y las características del residuo que servirá de combustible.

Además, se muestran características de equipos específicos existentes en el mercado para las distintas tecnologías seleccionadas.

También se realiza un balance de materia y energía, una vez el proceso y los equipos a utilizar, están definidos, y se presenta una estimación de los costes que implicaría la aplicación de éstos.

Abstract

In this project, it is mainly studied the best available techniques (BAT) that can be applied for the design of a waste to energy plant, according to a specific available treated waste.

The different techniques and technologies discussed in the BAT document or BREF for waste to energy are evaluated and the most appropriate ones are selected, according to criteria established in this same document and the characteristics of the waste that will be used as fuel.

In addition, specific equipment characteristics existing in the market for the different selected technologies are shown.

A mass and energy balance is also carried out, once the process and the equipment to be used are defined, and an estimate of the costs involved in applying them is presented.

Índice

Agradecimientos **vii**

Resumen **ix**

Abstract **xi**

Índice **xii**

Índice de Tablas **xiv**

Índice de Figuras **xvi**

1 Introducción **19**
1.1 El escenario actual de la gestión de la gestión de residuos. *19*
1.2 La Incineración de Residuos *25*
1.2.1 Técnicas de pretratamiento, almacenamiento y manejo 31
1.2.2 Técnicas para el tratamiento térmico 33
1.2.3 Recuperación de energía 42
1.2.4 Sistemas de Tratamientos de Gases de Combustión 46
1.3 Mejores Técnicas Disponibles (MTD) *55*
1.3.1 Mejores Técnicas Disponibles para Incineración de Residuos 55

2 Objetivos y Alcance **57**

3 Elección de equipos **59**
3.1 Datos generales de la planta y el Residuo *59*
3.2 Sistema de combustión *61*
3.3 Sistemas de tratamiento de gases de combustión *64*
3.3.1 Reducción de las emisiones de NOx 65
3.3.2 Reducción de las emisiones de partículas 68
3.3.3 Técnicas para la reducción de gases ácidos 69
3.3.4 Técnicas para la reducción de emisiones de mercurio 73

4 Cálculos **75**
4.1 Balances de Materia *75*
4.1.1 Cálculo de la cantidad de aire necesario para la combustión. 75
4.1.2 Cálculo de los gases de combustión. 76
4.1.3 Cálculo de reactivos para el tratamiento de los gases de combustión y emisiones 79
4.1.4 Cálculo de residuos sólidos 82
4.2 Balances de Energía *84*
4.3 Estimación de costes *89*

5 Conclusiones **92**

6 Referencias **93**

Anexos **97**
Anexo I *97*

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. PCI de algunas fracciones en RSU 24

Tabla 2. Eficiencias potenciales de conversión de energía para distintos tipos de plantas de incineración de residuos [38] 45

Tabla 3. Comparación de regulación de emisiones en diferentes países [32] 46

Tabla 4. Características de la corriente de RSU a incineración 60

Tabla 5. Composición de mayoritarios de la corriente de RSU a incineración 60

Tabla 6. Composición de minoritarios de la corriente de RSU a incineración 61

Tabla 7. Criterios comparativos entre TGC para gases ácidos 70

Tabla 8. Cálculo del aire estequiométrico necesario. 76

Tabla 9. Composición de gases de combustión a la salida del horno. 79

Tabla 10. Composición corrientes sistema RNCS 80

Tabla 11. Composición corrientes sistema SDA 81

Tabla 12. Composición de la corriente de gases emitidos a la atmósfera 82

Tabla 13. Caracterización de las escorias y las cenizas volantes 83

Tabla 14. Caracterización energética de los gases de combustión 85

Tabla 15. Caracterización energética de las escorias y CV 87

Tabla 16. Resumen de la estimación de costes 91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Jerarquía Europea en la Gestión de Residuos [2] 20
Figura 2. Economía circular- un sistema industrial regenerativo por diseño [5] 20
Figura 3. Tratamiento de RSU en la UE por tipo de tratamiento (kg per cápita) [7] 21
Figura 4. Maquina volteadora de compost [9] 22
Figura 5. Silos de clasificación de envases [10] 22
Figura 6. Generación de RSU en España [7] 23
Figura 7. Diagrama de bloques de una instalación de incineración. [18] 26
Figura 8. Procesos de tratamiento térmico de residuo. 27
Figura 9. Esquemas de diferentes reactores de gasificación 28
Figura 10. Representación esquemática de un proceso de pirólisis a baja temperatura 29
Figura 11. Diagrama de proceso de una planta de incineración de RSU [26] 30
Figura 12. Diagrama de bloques general de una planta TMB [28] 31
Figura 13. Trómel para separación de RSU 32
Figura 14. Búnker y tolva de alimentación [30] 32
Figura 15. De izquierda a derecha: Rampa de alimentación, alimentador de residuos, sistema de grúas 34
Figura 16. Parrilla oscilante 36
Figura 17. Parrilla reciprocante 36
Figura 18. Descargador de cenizas de Martin Biopower. 37
Figura 19. Diseños de hornos [35] 38
Figura 20. Horno rotativo [37] 39
Figura 21. Lecho fluidizado estacionario o de borboteo 41
Figura 22. Lecho fluidizado circulante 41
Figura 23. Lecho fluidizado rotativo 42
Figura 24. Incinerador con caldera horizontal 44
Figura 25. Incinerador con caldera horizontal 44
Figura 26. Esquema de funcionamiento de una bolsa. 47
Figura 27. Principio de funcionamiento de un precipitador electrostático [39] 48
Figura 28. Flujo de gases y partículas en un ciclón 49
Figura 29. Sistema de inyección seca 50
Figura 30. Sistema de inyección semihúmeda 50
Figura 31. Columna de relleno multietapas [42] 51
Figura 32. Sistema RCS. [44] 53
Figura 33. Esquema tratamiento Centro Integral de RSU Montemarta-Cónica 59
Figura 34. Capacidad de procesamiento por tecnologías [19] 62
Figura 35. Parrilla Dynagrate 63
Figura 36. Eje con refrigeración integrada 64

Figura 37. Distribución de la inyección de aire en el horno 65
Figura 38. Interior de Horno Dynagrate 65
Figura 39. Pulverización de agente reductor 66
Figura 40. Inyectores Turbotak TM 66
Figura 41. Control y bombeo de reactivos para reducción de NOx 67
Figura 42. Diagrama de componente de un PE de B&W 69
Figura 43. PE en incineradora de RSU 69
Figura 44. Diagrama de componentes del SDA 71
Figura 45. Atomizador 71
Figura 46. Diagrama de proceso del sistema SDA 72
Figura 47. Diagrama de un filtro de mangas B&W 73
Figura 48. Método de limpieza por pulsos 73
Figura 49. Diagrama de proceso de una instalación PAC 74
Figura 50. Silos de almacenamiento 74
Figura 51. Parámetros de combustión en horno de planta Reno-Nord [51] 77
Figura 52. Costes de inversión y mantenimiento para un precipitador electrostático 90

1 INTRODUCCIÓN

"Piensa globalmente, actúa localmente"
Jacques Ellul

La incineración de residuos es una práctica extendida por todo el mundo, con unas 1200 plantas activas en más de 40 países. Sin embargo, aún existen muchos lugares en el que esta tecnología debe ser implantada a la vez que va creciendo su economía y empiezan a implementarse planes de regulación sobre residuos.

Las plantas de incineración de residuos son el método de tratamiento de residuos que debe ser implantado tras el reutilizado y el reciclaje de los residuos sólidos urbanos (RSU) según la Directiva sobre Incineración de Residuos 2000/76/EC. En estas plantas es posible recuperar energía de los RSU, convirtiéndola en calor o electricidad, y reciclando a la vez vidrios y metales mediante el pre- tratamiento del residuo y el post- tratamiento de las cenizas de fondo generadas.

En este capítulo se va a describir la situación y la problemática actual de los residuos, como la incineración de residuo puede ayudar a mejorar esta situación, y se describirá el funcionamiento y las técnicas utilizadas en las principales plantas de incineración de residuos.

1.1 El escenario actual de la gestión de la gestión de residuos.

En el mundo se generan entre 7.000 y 10.000 millones de toneladas de residuos cada año. La gestión de estos residuos supone un gran reto, ya que la población sigue en crecimiento y a su vez lo hace el consumo. Por ello, es indispensable concienciar a la población de que se deben generar menos residuos y los que se generen se deben tratar de la manera más segura para el medioambiente.

Estos dos objetivos, entre otros, se exponen en la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos. Esto se muestra más específicamente con la jerarquía de residuos, mostrada en la Figura 1, que da un orden de prioridades en la legislación y la política sobre la prevención y la gestión de los residuos. [1]

Figura 1. Jerarquía Europea en la Gestión de Residuos [2]

Según ésta, Prevención, Reutilización y Reciclado tienen prioridad frente a la valorización o la eliminación, para poder alejarnos del modelo de economía lineal del que procedemos (resumido como ‘coger, producir, consumir y eliminar) para acercarnos cada más a una economía circular como la que se muestra en la Figura 2, que se puede definir como aquella en la que el valor de los productos, materiales y recursos se mantienen durante el mayor tiempo posible, minimizando el uso de recursos y la producción de residuos (es decir, lo que solía ser considerado como 'residuo' puede convertirse en un recurso valioso). [3]

Esta figura se muestra en el ‘Global Management Waste Outlook (GWMO)’ publicado por la Asociación Internacional de Residuos Sólidos (ISWA) y el Programa Medioambiental de las Naciones Unidas (UNEP), y según éste, usar los residuos de manera más eficiente y generar menos cantidad no solo reduce los riesgos de la salud pública y el medioambiente, sino que también reduce costes de negocios proporcionando ciertos beneficios como una menor vulnerabilidad frente a suministros de poca confianza, una menor dependencia global de materiales críticos y una menor gasto en recursos naturales. [4]

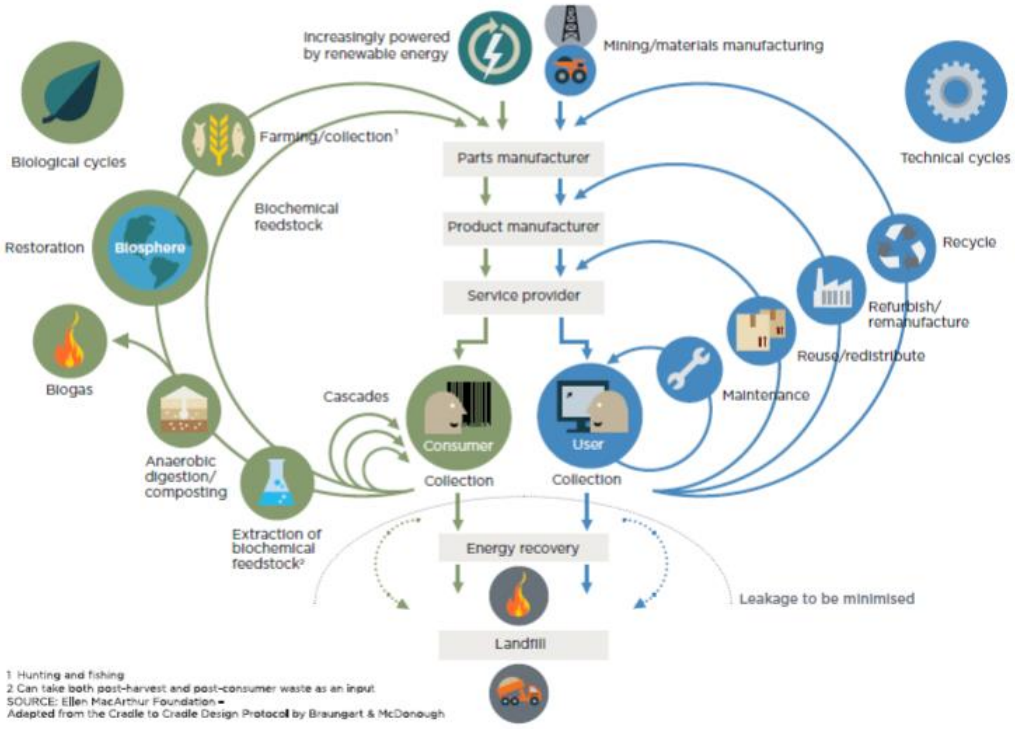

Figura 2. Economía circular- un sistema industrial regenerativo por diseño [5]

Estas dos figuras representan, con más o menos detalles, las soluciones o la manera de actuar para resolver la problemática actual de los residuos. Se ha querido presentar en primer lugar estas soluciones, ya que en eslabón más bajo de estas cadenas se encuentra uno de los problemas principales que es el de la eliminación de residuos en vertederos.

De los 7-10 mil millones de toneladas de residuos emitidos por año, se estiman que unos 2 mil millones son RSU. Los países desarrollados están estabilizando estas tasas de generación, sin embargo, estas cifras aumentan cada año en los países subdesarrollados y en vía de desarrollo. Es en estos países donde reside principalmente el problema, ya que la eliminación de residuos incontrolada es una práctica habitual al no disponer de servicios para la recogida de residuos. En los países desarrollados, la eliminación incontrolada esta erradicada al 95-100%, sin embargo, en otros países con economías más pobres se encuentra por debajo del 50%. Se estima que alrededor de 2 billones de personas en el mundo no tienen accesos a estos servicios.

La inadecuada eliminación y tratamiento de los residuos crea problemas, como la emisión de metano a la atmósfera. Los vertederos incontrolados son la tercera fuente antropogénica de emisión de CH_4, este gas de efecto invernadero es 24 veces más potente que el CO_2. Además de este, también incrementa otros riesgos como el de padecer enfermedades, o un caso más actual como es la posibilidad de que estos residuos acaben en los océanos. [6]

En los países desarrollados ya han aprendido de los errores del pasado, notando que la limpieza de los residuos eliminados de manera inadecuada en el pasado supones más coste que deshacerse de estos de una manera en concordancia con el medioambiente. La legislación se introdujo en los años 70, y a partir de aquí las normas requeridas para la eliminación de residuos han ido incrementando gradualmente. Afrontar estos cambios para conseguir un control de los RSU es uno de nos de los principales objetivos en los países en vía de desarrollo.

En Europa a pesar de los avances, la Comisión Europea cree que actualmente se pierden una cantidad importante de materias primas secundarias en las corrientes de desecho. Como se puede observar en la Figura 3 el 43% de los residuos generados en la Unión Europea es reciclado, mientras que el resto, es incinerado (26%) o enviado a vertederos (31%).

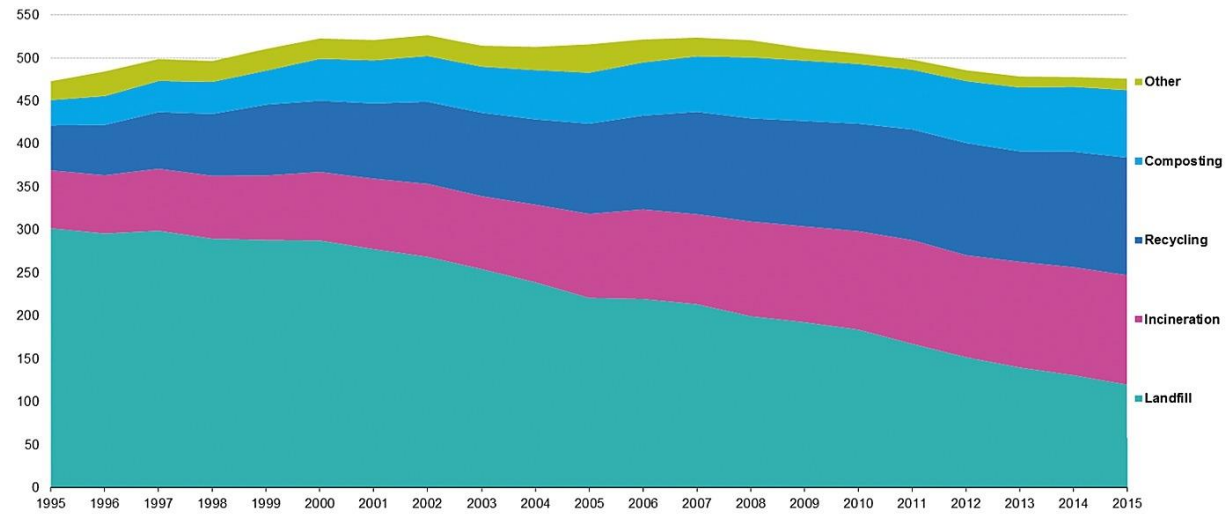

Figura 3. Tratamiento de RSU en la UE por tipo de tratamiento (kg per cápita) [7]

En 2017, el Parlamento Europeo propuso a la Comisión Europea revisar las directivas sobre residuos y propuso objetivos más ambiciosos que los establecidos anteriormente. Estos objetivos son la reutilización y reciclado de

al menos el 60% de los RSU para 2025 y 70% para 2030, con un máximo de 5% de los RSU enviados a vertederos.

Como se ha comentado anteriormente, en el año 2015, el 43% de los RSU es reciclado, dentro de este porcentaje se encuentran los residuos que son tratados mediante compostaje ya que la Comisión Europea lo enmarca dentro de este tipo, al ser una operación de valorización mediante la cual los materiales de residuos son transformados de nuevo en productos con cualquier otra finalidad distinta a la original.

El compostaje es un proceso controlado de transformación biológica aeróbica y termófila de materiales orgánicos biodegradables que da lugar a los tipos de abonos o enmiendas orgánicos. En la Figura 4, se muestra el tipo de proceso de compostaje más utilizado al ser el más económicos, es sistema de pilas volteadas. [8]

En la Figura 5 se muestran los silos de almacenamiento de una planta de reciclado de envases. En estos silos se depositan los distintos materiales a reciclar como pueden ser el PEAD (polietileno de alta densidad), PET (polietilentereftalato), PEBD (polietileno de baja densidad, generalmente en forma de film) que proceden del proceso de selección, bien manual o automático, y son depositados posteriormente en una prensa que los prepara para su envío a las distintas industrias que lo utilizaran como materia prima.

Figura 4. Maquina volteadora de compost [9]

Figura 5. Silos de clasificación de envases [10]

En España, como se puede observar en la Figura 3, en torno al 33% de los RSU son reciclados (incluyendo compostaje). En 2012 se contaba con 94 plantas de clasificación de residuos de envases y 63 plantas de compostaje. Sin embargo, la cantidad de residuos enviadas a vertederos es aún mayor, en torno al 55% de los residuos, que se distribuyen en un total de 134 vertederos.

Una de las metas del actual Plan Estatal en el Marco de Gestión de Residuos en España (PEMAR) es tratar el 100% de los RSU para 2020 aumentando, de ese modo, la eficiencia de recursos y recuperación de materiales valiosos en España. El PEMAR establece las directrices estratégicas. para la gestión de residuos en los próximos

desde 2016 a 2022 y las medidas necesarias para cumplir los objetivos de la UE. Este documento introduce una obligación de resultados en las Comunidades Autónomas, obligando a su vez a las regiones a alinearse y revisar sus estrategias regionales para alcanzar los objetivos específicos del plan nacional. [11]

Una de estas estrategias, puede ser la propuesta por la Comisión Europea que ha alentado a España a introducir un impuesto nacional sobre los vertederos o armonizar los impuestos regionales para eliminar el vertido de residuos reciclables y recuperables. [12]

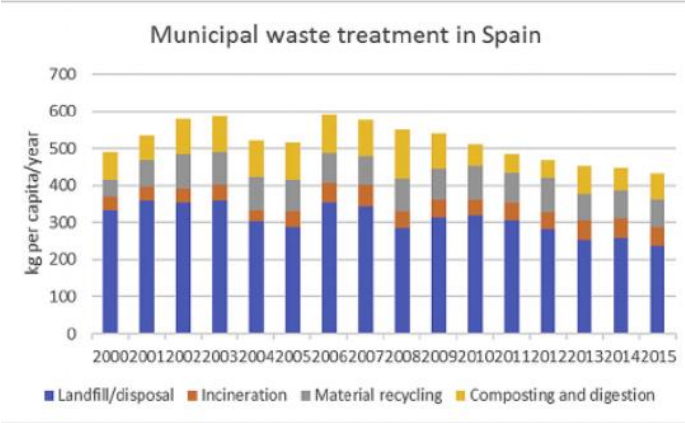

Figura 6. Generación de RSU en España [7]

Una de las soluciones, que ha sido implantada exitosamente en los países con economías más altas por sus numerosas ventajas, es la incineración de RSU. Ésta es la manera más eficiente de reducir el volumen de residuos y como hemos visto anteriormente en la jerarquía de residuos, es la técnica que debe sustituir a los vertederos.

Sin embargo, hay una visión bastante escéptica hacia la incineración de residuos, debido a la preocupación de que, al aumentar la capacidad de este tratamiento, se pongan en peligro la reutilización y el reciclaje. Este escepticismo se acrecienta debido a las toxinas liberadas y los gases de efecto invernadero por las incineradoras, Además, algunas ONG, como Zero Waste Europe (ZWE), declaran que, conceptualmente hablando, WtE no tiene un lugar en la economía circular, ya que los bucles de material se cierran cuando "no queda nada para quemar" Zero Waste Europe. Harmful subsidies to waste-to-energy incineration. [13]

Ciertamente, las plantas de WtE cumplen con los requisitos establecidos por la Directiva de Emisiones Industriales [14]. Y frente a estos contras la Comisión Europea expone que "Los procesos de conversión de residuos en energía pueden desempeñar un papel en la transición a una economía circular, siempre que la jerarquía de residuos de la UE se utilice como principio rector y que las decisiones tomadas no eviten niveles más altos de prevención, reutilización y reciclaje. Para ello, se recomienda a los Estados miembros que eliminen gradualmente el apoyo público para la recuperación de energía de residuos mixtos y que introduzcan o aumenten los impuestos de incineración. [15]

Por otro lado, a pesar del escepticismo hacia la incineración desde el punto de vista de la gestión de residuos, desde el punto de vista de la energía renovable es algo diferente ya que la Directiva sobre Energías Renovables (RED) define la fracción biodegradable de los residuos municipales como una de las fuentes de energía renovable. Esta inclusión de la parte orgánica de los RSU en la definición de fuentes potenciales de energía renovable ha permitido a los Estados miembros cumplir sus objetivos nacionales de energía renovable a través de la industria de incineración de RSU.

Por ello en la UE, el tratamiento térmico ha sido parte de una gestión de residuos sostenible desde hace décadas y ahora es parte fundamental en la infraestructura en muchos países. Sin embargo, este hecho, este lejos de darse en los países menos desarrollados, principalmente por dos motivos:

- El alto coste de inversión y operación necesario. Implementar una planta de incineración de RSU en un lugar con un sistema de gestión de residuos poco desarrollado y sin un correcto planeamiento puede dar lugar a un fracaso tanto medioambientalmente como económicamente, debido a ciertos riesgos como una variación en la cantidad de residuos recibidas, un bajo apoyo financiero, una inapropiada selección de tecnología o una inadecuada línea institucional.
- El proceso de incineración necesita un poder calorífico mínimo de los RSU, la viabilidad del proceso depende en gran medida de esto. Como se puede observar en la figura , los países con un alto grado de consumismo tienden a generar residuos de alto poder calorífico, debido a un mayor contenido en plásticos y cartones para embalajes, mientras que en países con un poder económico más bajo este contenido es menor y el contenido en materia orgánica en mayor. Este mayor contenido orgánico es el que le confiere un menor poder calorífico, una mayor densidad y humedad, haciéndolo más costoso para la incineración.

  En general, el poder calorífico inferior de un residuo a incinerar debe ser al menos de 7 MJ/kg. En la tabla 1 se muestra un PCI aproximado para las distintas fracciones de RSU.

Tabla 1. PCI de algunas fracciones en RSU

Fracción	**Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)**
Papel	16
Materia Orgánica	4
Plásticos	35
Vidrio	~0
Metales	~0
Textiles	19
Otros materiales	11

Por lo tanto, la incineración de RSU solo se considera adecuada en sistemas de gestión de residuos "maduros", donde la recolección de residuos funciona correctamente, donde el valor calorífico tiene un mínimo nivel y donde las tasas de eliminación requeridas lo permiten.

En resumen, la incineración generalmente solo debe considerarse como una opción si:

- Ya existe un sistema de gestión de residuos maduro y bien operado.
- Los RSU ya se están desechando en vertederos controlados y bien operados.
- El suministro de MSW combustibles debe ser al menos de 100.000 t / año. (Puede ser menor en zonas aisladas).
- El valor calorífico más bajo debe ser, en promedio, al menos 7 MJ / kg y nunca caer por debajo de 6 MJ / kg.
- La comunidad puede y está dispuesta a pagar el aumento del costo del tratamiento, por ejemplo, a través de cargos de administración, tarifas de inflexión, subsidios basados en impuestos o altas tarifas de

alimentación eléctrica. –

- El personal calificado puede ser contratado y mantenido.
- El sistema de planificación de la comunidad es estable y puede hacer una planificación adecuada a largo plazo. (+15 años). [16]

1.2 La Incineración de Residuos

Como se ha visto en el apartado anterior, la incineración en sí es normalmente sólo una parte de un sistema de tratamiento de residuos complejo que, en su conjunto, permite la gestión de la amplia gama de residuos que genera la sociedad.

El objetivo de la incineración de residuos, al igual que la mayoría de los tratamientos de residuos, es tratar los residuos con el fin de reducir su volumen y peligrosidad, capturando (y por lo tanto concentrando) o destruyendo las sustancias potencialmente nocivas. Los procesos de incineración también pueden ofrecer un medio que permita la recuperación del contenido energético, mineral o químico de los residuos.

Los residuos son por lo general materiales altamente heterogéneos, consistentes esencialmente en sustancias orgánicas, minerales, metales y agua. A pesar de que en el capítulo anterior solo se hizo referencia a la incineración de RSU, el sector de la incineración no solo se centra en un solo tipo de residuos, y aunque los enfoques varían mucho, puede dividirse aproximadamente en los siguientes subsectores principales [17]:

- Incineración de residuos urbanos mixtos: Normalmente tratan basuras y residuos domésticos mixtos y generalmente sin tratar, pero en ocasiones pueden incluirse ciertos residuos industriales y comerciales (los residuos industriales y comerciales se incineran también por separado en incineradores específicos de residuos no peligrosos industriales o comerciales).
- Incineración de residuos urbanos u otros residuos pretratados: Instalaciones que tratan residuos que han sido selectivamente recogidos, pretratados o preparados en algún modo, de modo que las características de los residuos difieren de los residuos mixtos. En este subsector se incluyen las incineradoras de la fracción de residuos no reciclables.
- Incineración de residuos peligrosos: Incluye la incineración en plantas industriales y la incineración en plantas comerciales (que normalmente reciben una amplia variedad de residuos).
- Incineración de lodos de depuradora: En algunos lugares, los lodos de depuradora se incineran separadamente de otros residuos en instalaciones específicas, en otros dichos residuos se combinan con otros (ej. residuos urbanos) para su incineración.
- Incineración de residuos clínicos: Existen instalaciones específicas para el tratamiento de residuos clínicos, normalmente los procedentes de hospitales y otras instalaciones sanitarias, en forma de instalaciones centralizadas o en las dependencias de los distintos hospitales, etc. En algunos casos, determinados residuos clínicos se tratan en otras instalaciones, por ejemplo, con residuos urbanos mixtos o residuos peligrosos.

Durante la incineración, inicialmente, los residuos se secan, luego se producen las reacciones de pirólisis y gasificación a medida que los compuestos volátiles se calientan y se desvolatilizan de la fase sólida a la fase gaseosa, y luego se queman. A medida que ocurre este proceso, se crean gases de combustión que contienen la mayoría de la energía de combustión disponible en forma de calor y se deja una ceniza compuesta principalmente de componentes inorgánicos. La combustión generalmente tiene lugar con un exceso de aire para asegurar que

se maximice la proporción de combustible que reacciona con el oxígeno.

Cuando el poder calorífico del residuo y el suministro de oxígeno es suficiente, esto puede producir una reacción térmica en cadena y combustión autoalimentada, es decir, que no requiere la adición de otros combustibles.

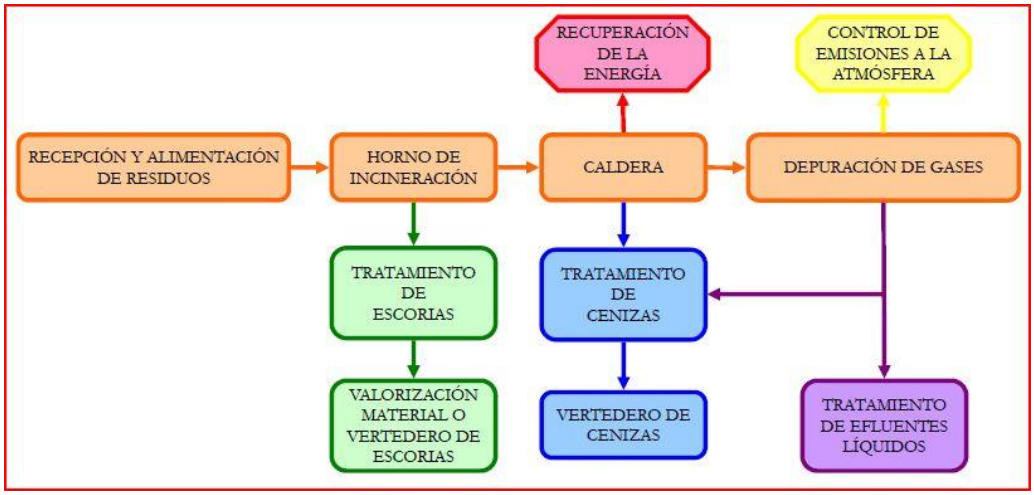

Figura 7. Diagrama de bloques de una instalación de incineración. [18]

En la Figura 7, se puede observar un diagrama de bloques de una instalación de incineración típica. La recuperación de energía es invariablemente en forma de una caldera de vapor que recupera el calor de los gases de combustión para generar vapor sobrecalentado. Se utiliza una turbina de vapor para generar electricidad, excepto en los casos en que el vapor se puede usar directamente en un proceso industrial de ubicación conjunta para calefacción.

La eficiencia eléctrica neta de una planta de incineración de RSU generalmente varía de 15 a 25% dependiendo del tamaño de la planta y las condiciones de vapor. Las eficiencias son relativamente bajas en comparación con las plantas de combustibles fósiles debido al menor valor calorífico del combustible y las limitaciones de las temperaturas del vapor para evitar la corrosión excesiva causada por los gases ácidos y otros compuestos producidos por la combustión de los RSU. Sin embargo, se pueden lograr eficiencias de hasta el 30% (solo electricidad) utilizando técnicas de recuperación de energía más avanzadas.

Para superar una eficiencia general del 30% sin la entrada de una fuente de calor externa, las plantas generalmente necesitan exportar calor, además de electricidad. Las eficiencias térmicas superiores al 30% son posibles en configuraciones combinadas de calor y energía, donde una parte del calor que se envía a la atmósfera en plantas que producen solo electricidad, se recupera para el uso del proceso. Los niveles más altos de recuperación de energía se logran en configuraciones donde solo se exporta calor, con eficiencias térmicas pueden superar el 80%.

Como se ha comentado anteriormente, durante la incineración solo se convierte el contenido orgánico de los RSU en energía, quedando atrás el contenido inerte que se denomina ceniza y está compuesto de material inorgánico mezclado con residuos de metales ferrosos y no ferrosos. La cantidad de ceniza varía según la demografía de las comunidades atendidas por la instalación y la cantidad de reciclaje que se realiza. Sin embargo, las instalaciones típicas de procesamiento térmico producen cenizas en el rango de 20% a 30% en peso de la alimentación total de residuos.

Dependiendo del marco regulatorio y del proceso de tratamiento, las cenizas de la parrilla de combustión (cenizas de fondo) pueden tratarse y reutilizarse, por ejemplo, como material de construcción. Las cenizas recolectadas de los gases de combustión (incluidas las partículas de ceniza que surgen de la caldera y los residuos

procedentes del tratamiento de gases de combustión) contienen compuestos peligrosos y generalmente requieren un tratamiento previo, una etapa de estabilización y eliminación cuidadosa en vertederos totalmente diseñados. [19]

Además del equipo necesario para la combustión, a veces, pueden efectuarse tratamientos previos para transformar los residuos en otras sustancias como pueden ser la pirólisis o la gasificación. Normalmente, cuando el destino de estos productos es la combustión, los equipos en los que se realizan estas operaciones se incluyen como una parte más de esta tecnología.

Sin embargo, estos procesos se pueden clasificar independientemente de la incineración, dentro de los tratamientos térmicos de residuos, o del más conocido térmico anglosajón Waste-to-Energy (WtE). Como se puede observar en la Figura, los procesos WtE diferencian combustión, gasificación y pirólisis, dependiendo de la concentración de oxígeno. La combustión tiene lugar en un ambiente con un exceso de oxígeno, la gasificación requiere una concentración de oxígeno ligeramente por debajo del nivel estequiométrico. La pirólisis se produce en ausencia de oxígeno. [20]

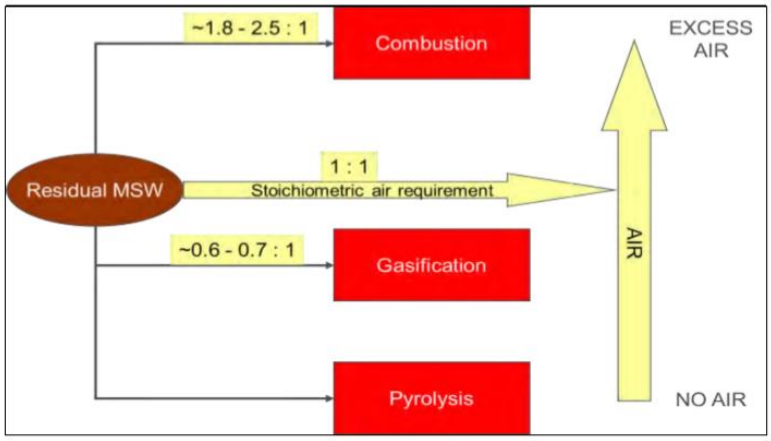

Figura 8. Procesos de tratamiento térmico de residuo.

La gasificación es una combustión parcial de sustancias orgánicas para producir un gas, mediante algunos procesos de reformado, que pueden usarse como materia prima, denominado gas de síntesis, o como combustible. [21]

Es importante que la naturaleza (tamaño, consistencia) de los residuos introducidos se mantenga dentro de ciertos límites predefinidos. En general, las materias primas requieren un procesamiento previo para eliminar los materiales inorgánicos (como los metales y el vidrio) que no se pueden gasificar. Además, el material alimentado generalmente se tritura en partículas muy pequeñas, y se seca antes de ser alimentado al gasificador [22].

Los residuos se alimentan al gasificador junto con una cantidad controlada de aire u oxígeno. Se emplean temperaturas relativamente altas, 900-1100 ºC con aire y 1000-1400 ºC con oxígeno. La gasificación por aire es la tecnología más utilizada. Este tipo es más barato, pero produce un syngas con una energía relativamente baja, que contienen hasta un 60% de nitrógeno, con un poder calorífico de 4-6 MJ / Nm^3. La gasificación con oxígeno proporciona un gas de síntesis de mayor valor calorífico de 10-18 MJ / Nm^3, pero el suministro de oxígeno es menos económico. La gasificación a alta temperatura también tiene el beneficio de fundir las cenizas (contenido inorgánico de los residuos de entrada) para producir una escoria, que es inerte [20].

Existen distintos procesos de gasificación disponibles o en desarrollo que, en principio, son adecuados para el tratamiento de residuos municipales, para ciertos residuos peligrosos y para lodo de depuradora seco. [23]

Algunos de los gasificadores más comunes se muestran en la Figura 9, estos son, de izquierda a derecha, los gasificadores de lecho fijo de corriente de aire ascendente, lecho fijo de corriente de aire descendente, lecho fluido y lecho de lujo de arrastre [24].

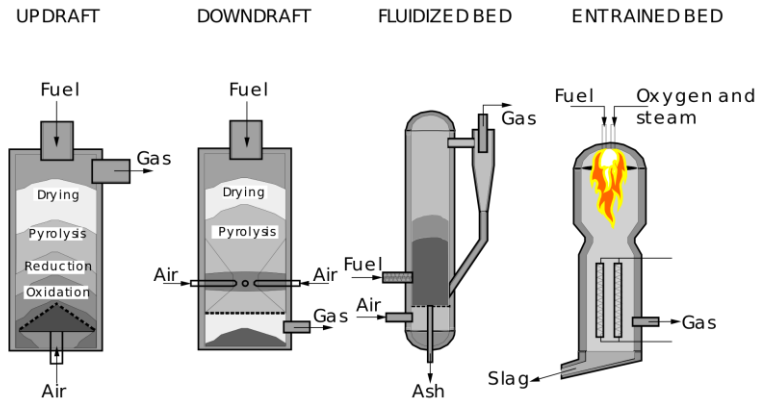

Figura 9. Esquemas de diferentes reactores de gasificación

Las características especiales del proceso de gasificación son [17]:

- Menor volumen de gas en comparación con el volumen de gases de combustión en incineración (en un factor de hasta 10 utilizando oxígeno puro).
- Formación predominante de CO en lugar de CO2.
- Elevadas presiones operativas (en algunos procesos).
- Acumulación de residuos sólidos como escoria (en gasificadores de escoria a alta temperatura).
- Agregados pequeños y compactos (especialmente en gasificación a presión).
- Utilización material y energética del gas de síntesis.
- Menores caudales de aguas residuales de la limpieza del gas de síntesis.

La pirólisis es un proceso en ausencia de oxígeno, durante el cual se forma gas de pirólisis y un coque sólido. El poder calorífico del gas de pirólisis está normalmente entre 5 y 15 MJ/m³ si es a base residuos urbanos, y entre 15 y 30 MJ/m³ si se basa en RDF. En un sentido amplio, «pirólisis» es un término genérico que incluye una serie de combinaciones de diferentes tecnologías que constituyen, en general, los siguientes pasos tecnológicos [21]:

- Proceso de combustión lenta: Formación de gas a partir de partículas de residuos volátiles a temperaturas entre 400 y 600°C
- Pirólisis: Descomposición de las moléculas orgánicas del residuo entre 400 y 800°C, que produce la formación de gas y de una fracción sólida
- Gasificación: Conversión de la fracción de carbono remanente en el coque de pirólisis, a 800-1000°C con ayuda de una sustancia de gasificación (ej., aire o vapor), en un gas de proceso (CO, H2)
- Incineración: Según la combinación de tecnologías, el gas y el coque de pirólisis se combustionan en una cámara de incineración

Existe una cierta controversia con respecto a las diferencias entre la gasificación y la pirólisis. La pirólisis como tal, se lleva a baja temperatura (400 ºC) y tal como se muestra en la Figura 9, produce un producto líquido primario, así como cantidades bajas de gas de síntesis y productos en fase sólida. Si la pirólisis se opera a alta temperatura (> 800 ° C), el producto primario se convierte en gas de síntesis, pero el proceso también producirá productos en fase líquida y sólida en cantidades menores. La cantidad de carbón producido a bajas y altas temperaturas no varía mucho

Por tanto, a temperaturas más altas, a pesar de la falta de oxígeno, estos procesos pueden considerarse similares a la gasificación, es decir, el único objetivo es producir gasas como gas de síntesis. Sin embargo, la composición del gas de síntesis será diferente, ya que tiene un mayor valor calorífico (CV) y niveles más altos de alquitrán e impurezas.

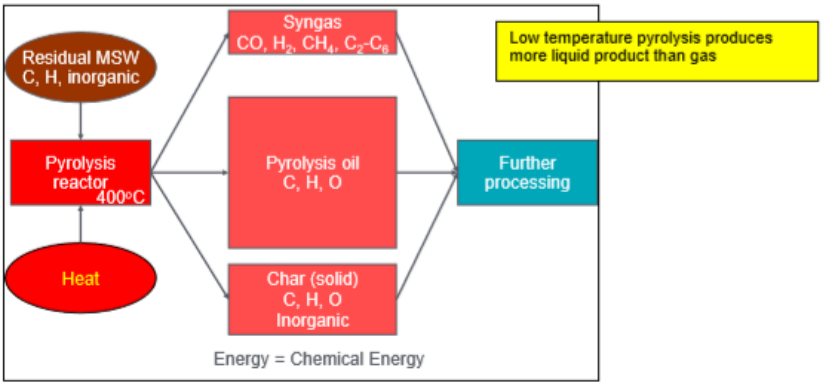

Figura 10. Representación esquemática de un proceso de pirólisis a baja temperatura

Las ventajas potenciales de los procesos de pirólisis son [23] [25]:

- Posibilidad de recuperar el valor material de la fracción orgánica, p. ej. Como metanol
- Posibilidad de una mayor generación de electricidad utilizando motores o turbinas de gas para la generación (en lugar de calderas de vapor)
- Menores volúmenes de gases de combustión, lo que puede reducir los costes de inversión en tratamiento de gases de combustión en cierta medida
- La posibilidad de cumplir especificaciones para uso externo del coque producido mediante lavado (ej. contenido de cloro)

Esta sección sirve como una introducción donde se ha expuesto una descripción general de la incineración de residuos y de otros los procesos que se llevan en las instalaciones modernas de recuperación de energía de residuos (WtE).

A continuación, la sección está dividida en subsecciones, cada una de las cuales describe con más o menos profundidad conceptos y componentes principales de una instalación de incineración siguiendo el flujo del proceso. En general, estos son:

- Recepción de residuos entrantes
- Almacenamiento de residuos y materias primas
- Pretratamiento de residuos (cuando se requiere, in situ y externamente)
- Carga de residuos en el proceso

- Tratamiento térmico de los residuos
- Etapa de recuperación y conversión de energía (ej. Caldera)
- Limpieza de gases de combustión
- Gestión de residuos de limpieza de gases de combustión
- Descarga de los gases de combustión
- Monitorización y control de emisiones
- Control y tratamiento de aguas residuales (ej. Del desagüe de la instalación, tratamiento de gases de combustión, almacenamiento)
- Gestión y tratamiento de cenizas/cenizas de fondo (de la etapa de combustión)
- Descarga/eliminación de residuos sólidos
-

En el ejemplo que se muestra en la Figura 11, las etapas de almacenaje y manejo de residuos entrantes se encuentran a la izquierda del esquema. El sistema de limpieza de gases de combustión se muestra a la derecha del horno y la caldera, y la etapa de generación de energía se muestra en la parte superior. En este ejemplo se muestra una determida configuración de equipos, pero esta puede cambiar, incluir algunos más o quitar otros según las necesidades.

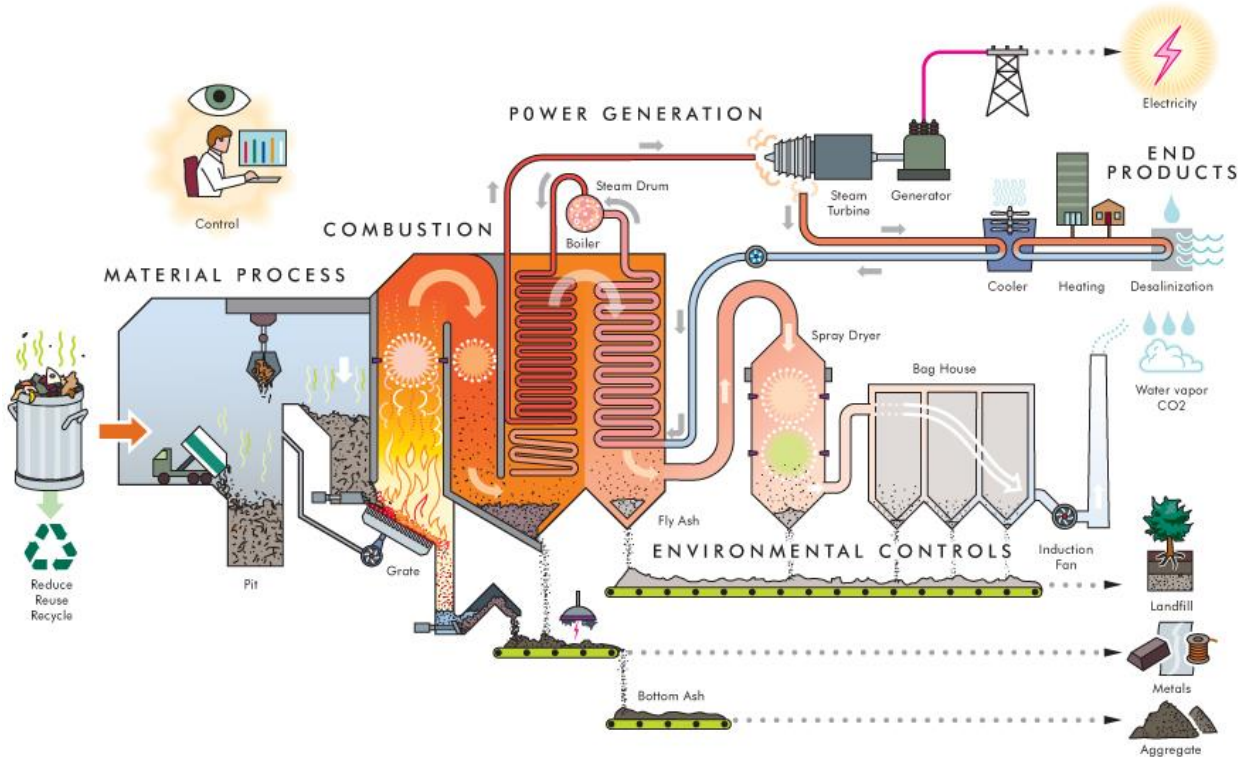

Figura 11. Diagrama de proceso de una planta de incineración de RSU [26]

1.2.1 Técnicas de pretratamiento, almacenamiento y manejo

La zona de suministro de residuos es el lugar al que llegan los camiones, trenes o contenedores de suministro para descargar las basuras en el búnker, normalmente tras su inspección visual y pesaje. La descarga se realiza a través de entre la zona de suministro y el búnker. Las aberturas pueden cerrarse, y por consiguiente también sirven como barreras herméticas contra olores, así como dispositivos de protección contra incendios y choques. El aislamiento de la zona de suministro puede ser también una forma eficaz de evitar problemas de olor, ruido y emisiones de los residuos.

Previo a la alimentación al búnker, el pretratamiento de RSU se suele limitar a la trituración de las balas prensadas, residuos voluminosos, etc., aunque en ocasiones se utiliza una trituración más a fondo. Se emplea el siguiente equipo:

- Cortadoras de palanca
- Trituradora
- Molinos
- Cortadoras giratorias

Generalmente es necesario pretratar (es decir, machacar) los residuos voluminosos cuando su tamaño es mayor que el del equipo de alimentación del horno. Otro motivo del pretratamiento es homogeneizar el residuo a fin de que tenga características de combustión más consistentes (ej. algunos residuos con elevados CCN).

Esto puede conseguirse mezclando, machacando o triturando los residuos. El pretratamiento adicional de residuos es inusual en las plantas con hornos de parrilla, pero puede ser esencial para otros diseños de horno.

Sin embargo, a veces los RSU tienen un mayor tratamiento, ya que previamente se le separan los residuos reciclables. Cuando esto ocurre, se obtiene lo que se denomina combustible sólido recuperado (CSR), más conocido por sus siglas en inglés RDF (refused derived fuel). RDF también se refiere a la fracción de alto poder calorífico de los RSU (entre 10 y 15 MJ/kg). [27]

Las plantas en las que se producen este RDF o CSR se denominan plantas de tratamiento mecánico-biológico, TMB, (o biológico-mecánico, TBM), y como su propio nombre indica, son una combinación de procesos físicos y biológicos.

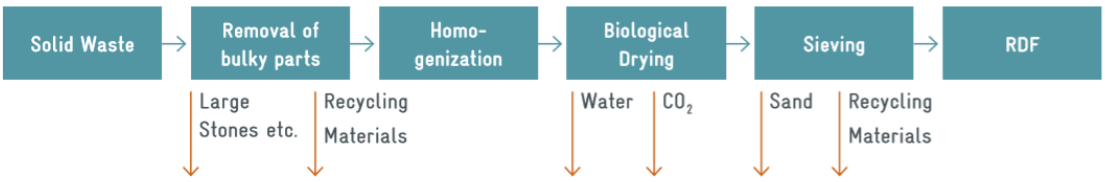

Figura 12. Diagrama de bloques general de una planta TMB [28]

En la Figura 12 se puede observar un diagrama de bloques correspondiente a una planta TMB, en este caso, esta planta consta un tratamiento mecánico, un biosecado de materia orgánica y un acondicionamiento del rechazo. Pero este modelo de planta no es el único, las instalaciones TMB/TBM pueden funcionar con diferentes líneas y tecnologías en función de las necesidades. Se pueden dar las siguientes posibles combinaciones:

- Tratamiento mecánico (+Acondicionamiento rechazo). No se da la segunda fase de tratamiento biológico
- Tratamiento mecánico +Bioestabilización de la materia orgánica (compostaje) (+Acondicionamiento

rechazo)

- Tratamiento mecánico +Biometanización de materia orgánica +Bioestabilización del digestato (+Acondicionamiento rechazo)
- Bioestabilización/Biosecado +Tratamiento mecánico (+Acondicionamiento rechazo)

En la Figura 13, se puede observar el interior de un trómel utilizado para la separación mecánica de RSU. En general, los tratamientos mecánicos constan de las siguientes técnicas:

- Separación por trómel y separación mecánica de inertes de la fracción fina asociadas a la digestión seca
- Separación por trómel y, acondicionamiento y separación de impurezas de la fracción fina con púlper asociado a la digestión húmeda
- Separación por percolación asociada a la digestión del percolado
- Separación y acondicionamiento con tambores de pretratamiento
- Clasificación de los materiales reciclables (equipos equivalentes a los utilizados en las instalaciones de clasificación de envases ligeros) [29]

Figura 13. Trómel para separación de RSU

Como se ha comentado anteriormente, los residuos, previamente a ser alimentados a la zona de incineración se almacenan en un búnker. El búnker es normalmente un lecho de cemento impermeable. Los residuos se apilan y mezclan en el búnker mediante grúas provistas de garfios. La mezcla de los residuos ayuda a conseguir una mayor uniformidad en poder calorífico, tamaño, estructura, composición, etc. del material vertido a las tolvas de llenado de la incineradora. En la Figura 14, se puede observar el interior de un búnker y la entrada a la tolva de alimentación.

Figura 14. Búnker y tolva de alimentación [30]

Frecuentemente, equipos de protección contra incendios son utilizado en la zona del búnker y en el sistema de alimentación. Por ejemplo:

- Cables ignífugos para las grúas
- Diseño de seguridad de las cabinas de las grúas
- Detectores de incendios;
- Cañones aspersores automáticos de agua, con o sin espuma.

Las cabinas de las grúas están diseñadas de modo que el operario de la grúa tenga una buena perspectiva de todo el búnker. La cabina cuenta con su propio sistema de ventilación, independiente del búnker.

Con el fin de evitar una excesiva formación de polvo y de gases (ej. metano) de los procesos de fermentación, así como la acumulación de olor y emisiones de polvo, el aire de incineración primario para la planta del horno se suele extraer de la zona del búnker.

El búnker suele tener una capacidad de almacenamiento para varios días (normalmente 3-5 días) de productividad operativa de la planta. Esto depende mucho de factores locales y de la naturaleza específica del residuo.

Pueden existir dispositivos de seguridad adicionales como: columna reguladora seca a nivel de la tolva de residuos, tobera de espuma extintora sobre el nivel de la tolva de residuos, detección de incendios para el grupo hidráulico, paredes ignífugas entre la sala del horno y la sala de control, cortinas de agua en la ventana entre la sala de control y el horno, extracción de humos y fuego (5-10 % de la superficie del techo) etc. [17]

1.2.2 Técnicas para el tratamiento térmico

Una instalación industrial destinada a la incineración de residuos sólidos debe ser capaz de lograr los siguientes objetivos [18]:

- Buen contacto entre el sólido y el aire para que pueda alcanzarse la temperatura de combustión y la transformación de los reactantes en los productos de reacción. Las velocidades de transferencia de materia y de transmisión de calor se efectúan a velocidad elevada cuando se opera con velocidades relativas del aire con respecto del sólido, altas.
- Distribución de tiempos de residencia apropiada para conseguir la transformación completa de los reactivos. Todos los sólidos deben estar en el horno un tiempo mayor o igual que el necesario para la conversión completa. Este tiempo depende de las variables del modelo cinético gas-sólido que describa el proceso. Cuando se logran rendimientos elevados se evita que salgan del horno compuestos inquemados tanto con la fase gas como con la fase sólida. De esta manera se consigue, además de aumentar el rendimiento energético del proceso, disminuir la emisión de contaminantes en el propio lugar donde se generan, con las ventajas que significa a la hora de depurar la corriente de gases a evacuar.
- Eliminación de cenizas y escorias para evitar que la fracción no combustible se acumule en el interior del horno. Es preciso extraerlas continuamente, si es continuo, o antes de cada operación, si es por cargas. Cuando el horno contiene un material inerte, como arena, al eliminar la ceniza se elimina también una parte del inerte y una fracción de la alimentación que no ha estado suficiente tiempo para quemarse completamente.
- La distribución de temperaturas en el horno debe permitir que el sólido alimentado vaya alcanzando los sucesivos valores que se requieren para que transcurran los distintos procesos que experimentan los

residuos en su combustión. Pero, además de los fenómenos deseados, se pueden producir otros que causan problemas de operación

Las tecnologías más comunes que pueden cumplir estos requisitos son:

- Incineradores de parrilla
- Hornos rotativos
- Lechos fluidizados

1.2.2.1 Incineradores de parrilla

Las tecnologías de horno de parrilla móvil es la más utilizada en el tratamiento térmico de residuos, con más de 1.000 plantas operativas en todo el mundo.

Los incineradores de residuos normalmente tienen los siguientes componentes:

- Alimentador de residuos
- Parrilla de incineración
- Descargador de ceniza de fondo
- Sistema de conducción de aire de incineración
- Cámara de incineración
- Quemadores auxiliares

Como se ha comentado en el punto anterior, los residuos se descargan desde el búnker de almacenamiento a la rampa de alimentación, mediante una grúa suspendida y luego son alimentados al sistema de parrilla mediante una rampa hidráulica u otro sistema transportador. Estos sistemas se pueden observar en la Figura 15.

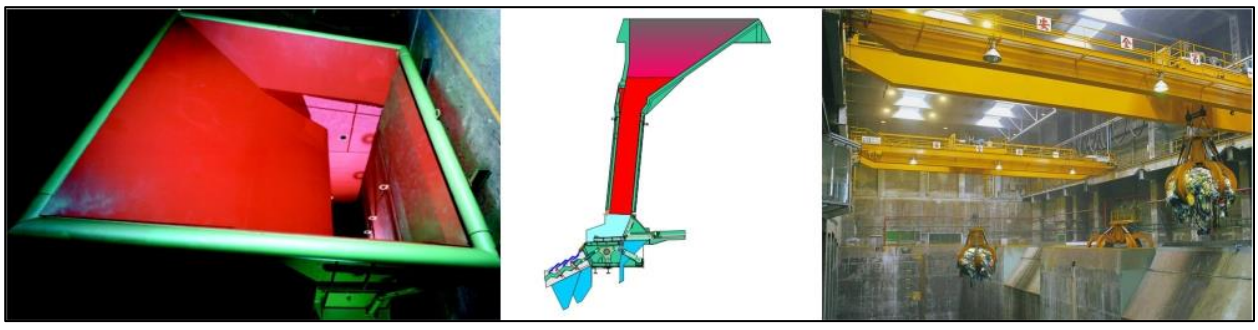

Figura 15. De izquierda a derecha: Rampa de alimentación, alimentador de residuos, sistema de grúas

La tolva de llenado se utiliza para el suministro continuo de residuos. La grúa suspendida la va llenando de forma discontinua. Dado que la superficie de llenado la tolva está expuesta a una gran tensión, se seleccionan materiales con alta resistencia a la fricción (ej., placas de caldera de fundición resistente al desgaste). El material debe sobrevivir a incendios ocasionales de la tolva sin daños.

En ocasiones, la tolva de residuos es alimentada por una cinta transportadora. En tal caso, la grúa suspendida

descarga los residuos en una tolva intermedia que alimenta la cinta transportadora.

Las paredes de la rampa de alimentación pueden protegerse del calor:

- Construcción con doble capa y refrigeración por agua
- Construcción de las paredes con membrana
- Válvulas de cierre refrigeradas por agua
- Revestimiento de ladrillo refractario

Si la rampa de alimentación está vacía, pueden utilizarse válvulas de cierre (ej. compuertas de cierre) para evitar retrocesos de llamas y para la prevención de la infiltración incontrolada de aire en los hornos. Se recomienda que haya una cantidad uniforme de residuos en la rampa de llenado para una gestión uniforme del horno. Los detectores de nivel de microondas informan de la altura de la columna de desechos en la tolva al operador de la grúa

La unión entre la parte inferior de la rampa de llenado y el horno consta de un mecanismo de dosificación. El mecanismo de dosificación puede estar impulsado mecánica o hidráulicamente. Su velocidad de alimentación es generalmente ajustable. El sistema de control de combustión prescribe el tiempo de ciclo, la longitud de polea y la velocidad de entrada para lograr una combustión uniforme en la rejilla. [25] [31]

Una vez que el combustible se encuentra en la parrilla de incineración esta transporta los materiales a incinerar a través del horno y posiciona la zona de incineración principal en la cámara de incineración, posiblemente en combinación medidas de control de rendimiento del horno.

Uno de los objetivos de la parrilla de incineración es una buena distribución del aire de incineración en el horno, de acuerdo con los requisitos de combustión. Un soplante de aire primario fuerza la entrada de aire, a través de pequeñas aberturas de la capa de la parrilla, hasta la capa de combustible. Normalmente se añade más aire sobre el lecho de residuos para completar la combustión.

Es frecuente que algunos materiales finos (que a veces se denominan cribados o tamizados), caigan a través de la parrilla. Este material es recuperado en el fondo por el extractor de ceniza. A veces se recupera separadamente y puede reciclarse a la parrilla para su nueva incineración o retirarse directamente para su eliminación. Cuando el tamizado se recircula a la tolva, debe tenerse cuidado de que no incendie los residuos de la tolva.

Normalmente, el tiempo de permanencia de los residuos en las parrillas no es superior a 60 minutos.

Otras características pueden incluir controles adicionales, o una construcción más robusta para resistir las duras condiciones en la cámara de combustión. En algunos casos se pasa un medio refrigerante líquido (normalmente agua) a través del interior de la parrilla. La circulación del medio refrigerante va desde zonas más frías a zonas progresivamente más calientes con el fin de aumentar al máximo la transferencia de calor. El calor absorbido por el medio refrigerante puede transferirse para uso en el proceso o para suministro externo.

La refrigeración por agua se aplica con mayor frecuencia cuando el calor calorífico del residuo es más alto (entre 12-15 MJ/kg para RSU). Al enfriar parcialmente la rejilla con agua, es posible ajustar el suministro de aire primario exactamente al flujo necesario para el proceso de combustión primaria, mejorando así el rendimiento en la combustión.

Pueden distinguirse distintos sistemas de parrillas, atendiendo al modo en que los residuos son transportados a través de las distintas zonas de la cámara de combustión. Los más comunes son las parrillas oscilantes, las parrillas reciprocantes inversa y las parrillas de empuje, otras menos utilizadas pueden ser las parrillas de rodillo o las parrillas móviles. [32] [17]

En la Figura 16, se muestra el diagrama de una parrilla oscilante. Las secciones de la parrilla están colocadas a través del ancho del horno. Se aplica una basculación u oscilación en filas alternas para producir un movimiento hacia arriba y de avance, que hace avanzar y agita los residuos.

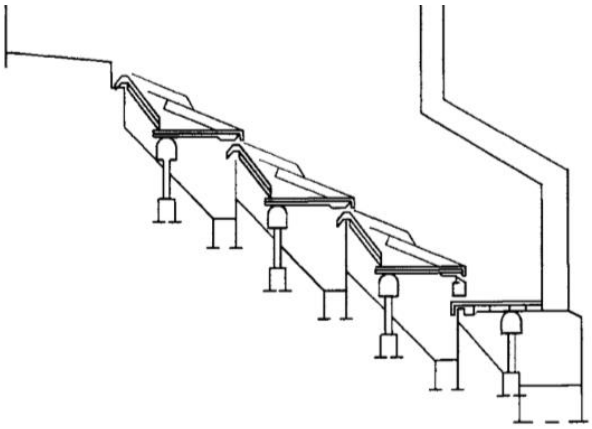

Figura 16. Parrilla oscilante

Las parrillas reciprocantes y la de empuje también forman secciones que cubren el ancho del horno, pero están apiladas unas sobre otras. En la parrilla reciprocante inversa, mostrada en la Figura 17, las barras de la parrilla oscilan adelante y atrás en dirección inversa al flujo de residuos y está inclinada desde el extremo de la alimentación hasta la descarga de cenizas, se compone de secciones de parrilla fijas y móviles. En la de empuje la parrilla forma una serie de escalones que oscilan horizontalmente y empujan los residuos en la dirección de la descarga de ceniza. [32]

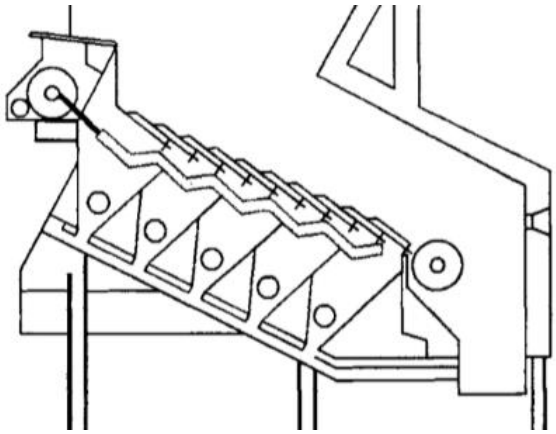

Figura 17. Parrilla reciprocante

La ceniza de fondo cae en un descargador de ceniza de fondo que se utiliza para enfriar y extraer todo el residuo sólido que se acumula en la parrilla. También sirve como junta de estanqueidad para el horno y enfría y humidifica la ceniza.

Para la extracción de la ceniza de fondo se utilizan normalmente sistemas de pistón y arrastre llenos de agua. También se suelen utilizar otros sistemas de descarga de las cenizas de fondo, como cintas transportadoras. Así se transportan las cenizas de la parrilla, así como los objetos voluminosos que puedan quedar.

En la Figura 18, se muestra un descargador de fondo de pistón. En este, el consumo de agua depende exclusivamente de la temperatura de las cenizas del fondo y de su capacidad para absorber agua. Solo el agua necesaria para apagar la ceniza se alimenta al descargador.

El diseño básico es el mismo para todos los descargadores. El descargador está lleno de agua y una cantidad constante de ceniza de fondo hasta el nivel de la pared frontal de sellado de aire. Esto crea un sello de aire contra

el horno, evitando así que los gases de combustión y la contaminación térmica en la base del horno, por un lado, y la entrada de aire no necesario en la caldera por el otro.

El pistón de descarga empuja la ceniza inferior por debajo de la pared de sellado de aire hacia el borde de caída. Como resultado, la ceniza del fondo se descarga libre de polvo y sin olor. Hay una sección de drenaje antes del borde de caída donde se extrae el exceso de agua que se forma por la acción de compresión del pistón de descarga. Por lo tanto, la ceniza del fondo sale húmeda, pero sin agua en exceso. [34]

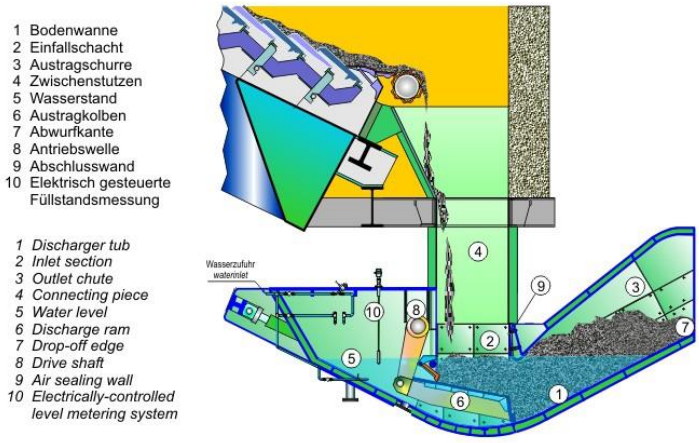

Figura 18. Descargador de cenizas de Martin Biopower.

Por otro lado, desde la parrilla de incineración se desprenden los gases volátiles que pasan a la cámara de combustión o incineración. La configuración de éstas juega un papel importante en la facilidad con que se puede controlar la combustión y la calidad de la ceniza que sale de la parrilla. El camino que toman los gases de combustión después de dejar los residuos quemados es muy importante para garantizar una combustión uniforme y completa.

Los siguientes requisitos influyen en el diseño de la cámara de incineración:

- Forma y tamaño de la parrilla de incineración: el tamaño de la parrilla determina el tamaño de la sección transversal de la cámara de incineración
- Vorticidad y homogeneidad del flujo de gases de combustión: la mezcla completa de los gases de combustión es esencial para una buena incineración de los gases de combustión
- Tiempo de residencia suficiente de los gases de combustión en el horno caliente: debe asegurarse un tiempo de reacción suficiente a altas temperaturas para una incineración completa
- Enfriamiento parcial de los gases de combustión: para evitar la fusión de la ceniza volante caliente en la caldera, la temperatura de los gases de combustión no debe superar un límite superior a la salida de la cámara de incineración

En general existen 3 configuraciones para el horno, que se pueden observar en la Figura 19:

- Flujo paralelo: La salida de los gases de combustión se encuentra al final de la parrilla. El principio de flujo paralelo ofrece una serie de ventajas como son: una alta eficiencia de combustión, buena combustión de residuos sólidos y gases de combustión, mejor calidad de la escoria, todos los gases de pirólisis deben pasar por la zona de máxima temperatura, un tiempo de residencia prolongado en la zona de reacción y muy baja emisión de CO + NOx.

- Flujo central: En este caso, la salida de gases de combustión se encuentra situada en mitad de la parrilla. Ese tipo de hornos es ideal para desechos con alto poder calorífico ya que los elementos volátiles del combustible pueden transportarse a la cámara de postcombustión y quemarse relativamente rápido. residuos. Debe conseguirse una buena mezcla de todas las corrientes parciales de gases de combustión mediante contornos que promuevan mezcla y/o inyecciones de aire secundario.
- Horno a contraflujo o contracorriente: En este caso, el aire de combustión primario y los residuos son guiados siguiendo un flujo a contracorriente a través de la cámara de combustión, y la salida de gases de combustión se encuentra situada en el extremo frontal de la parrilla. Los gases de combustión calientes facilitan el secado y la ignición de los residuos. [17] [32]
-

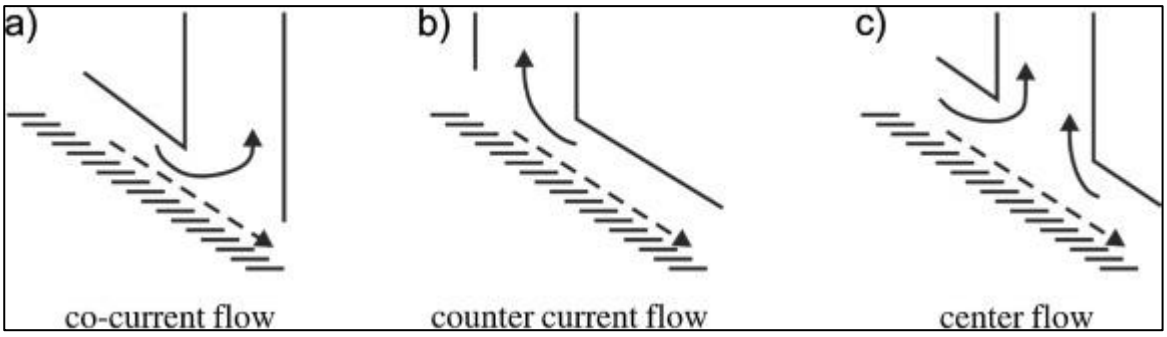

Figura 19. Diseños de hornos [35]

Otro de los puntos importantes del diseño del incinerador, es la alimentación del aire de combustión. El aire de incineración cumple los siguientes objetivos:

- Aporte de oxidante
- Refrigeración
- Evita la formación de escoria en el horno
- Mezcla de gases de combustión

El aire se añade en varios puntos de la cámara de combustión. Normalmente se describe como primario y secundario, aunque también se utiliza aire terciario y gases de combustión recirculados.

El aire primario se toma generalmente del búnker de residuos. Esto reduce la presión de aire de la sala del búnker y elimina la mayor parte de emisiones de la zona del búnker. El aire primario es soplado por ventiladores a las zonas situadas bajo la parrilla, donde su distribución puede ser estrechamente controlada mediante múltiples cajas de aire y válvulas de distribución.

El aire puede precalentarse en caso de que se sea necesario pre-secar el residuo. Como se ha comentado anteriormente, el aire primario se fuerza a través de la capa de la parrilla al lecho de combustible. Esto enfría la barra de la parrilla y lleva oxígeno al lecho de incineración.

El aire secundario se sopla a la cámara de incineración a altas velocidades a través, por ejemplo, de lanzas de inyección o desde estructuras internas. Esto se realiza para asegurar la completa incineración, y es responsable de la mezcla intensiva de los gases y de la prevención del paso libre de las corrientes de gases sin combustionar.

Para conseguir una buena combustión de los gases de combustión, la legislación ha establecido una temperatura de combustión mínima de la fase gas de 850°C (1100°C para algunos residuos peligrosos) y un tiempo de residencia mínimo de los gases de combustión, por encima de esta temperatura, de dos segundos después del último aporte de aire de incineración [1].

La legislación anterior requería un contenido mínimo de oxígeno del 6 %, aunque este requisito ha sido eliminado de la Directiva CE más reciente sobre incineración.

Otra medida que pretende lograr una combustión completa es la limitación de la concentración de monóxido de carbono en periodos temporales cortos (10-30 minutos) y así evitar un comportamiento fluctuante. La necesidad de conseguir en todos los hornos de incineración estas condiciones mínimas obliga a instalar recintos aislados térmicamente —cámaras de postcombustión— y quemadores de apoyo para elevar la temperatura cuando es necesario.

Estos quemadores se suelen activar automáticamente si la temperatura cae por debajo del valor especificado durante el funcionamiento.

En el arranque, normalmente se utilizan para calentar el horno hasta una temperatura especificada a través de la cual puedan pasar los gases de combustión.

Durante el apagado, los quemadores sólo suelen utilizarse si hay residuos en el horno. [18] [17]

1.2.2.2 Hornos Rotativos

Esta tecnología se utiliza también comúnmente para residuos clínicos (los residuos clínicos más peligrosos se incineran en incineradoras con hornos rotativos a alta temperatura, pero bastante menos para residuos urbanos.

En la Figura 20, se puede observar el diagrama de un horno rotativo. Este tipo de horno consiste en un vaso cilíndrico ligeramente inclinado sobre su eje horizontal. El vaso está normalmente situado sobre rodillos, que permiten que el horno gire u oscile alrededor de su eje (movimiento de vaivén).

El proceso de incineración se realiza a una temperatura de 850 ° C a 1100 ° C, dependiendo del contenido de compuestos de cloro en los residuos. El tiempo de residencia de los residuos en el tambor depende de la inclinación y la velocidad de rotación del tambor.

La ceniza acumulada en la cámara del horno se suele verter en un transportador de escoria y se lleva un contenedor. Los escapes de la cámara de combustión se canalizan hacia la cámara de postcombustión, donde las fracciones gaseosas combustibles aún presentes en los gases de escape se queman aún más gracias a una cantidad apropiada de aire introducido y un tiempo de residencia mantenido para garantizar el tiempo de retención de gases de escape de 2 segundos requerido por ley. Los gases de escape calientes fluyen desde la cámara de postcombustión a la caldera de recuperación de calor. [17] [36]

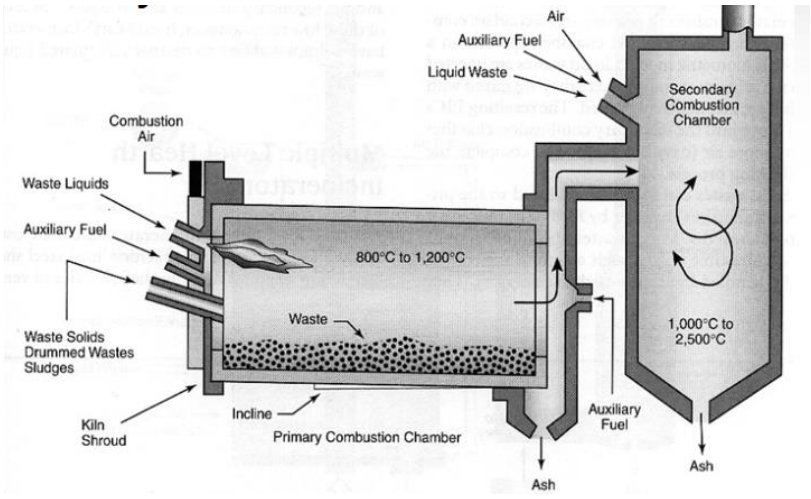

Figura 20. Horno rotativo [37]

1.2.2.3 Lechos Fluidizados

Los incineradores de lecho fluidizado se aplican ampliamente a la incineración de residuos de pequeña granulometría, como RDF y lodos de depuradora. Se han utilizados durante décadas, principalmente para la combustión de combustibles homogéneos, como hulla, lignito crudo, lodos de depuradora y biomasa (ej., madera).

El reactor generalmente consiste en una cámara de combustión vertical de acero revestido con material refractario que contiene, en su parte inferior, un lecho de inertes tal como arena de sílice, piedra caliza, alúmina o material cerámico. El material del lecho está soportado por una rejilla refractaria. Esta rejilla está perforada para permitir que el aire se inyecte a través de difusores ubicados debajo de la rejilla. El aire que pasa a través de la rejilla expande el lecho en un 80 a 100%, lo que hace que se fluidifique.

Los residuos pueden inyectarse en el lecho neumáticamente, mecánicamente o por gravedad.

La acción de movimiento constante del lecho fluidizado provoca una mezcla rápida y uniforme de los desechos y el material del lecho, lo que resulta en buenas condiciones de combustión y tasas de transferencia de calor relativamente altas. Además, el movimiento en el lecho y su capacidad de almacenamiento térmico inherente aumenta la combustión del material y minimiza la generación de cenizas de fondo.

En el lecho fluidizado se realiza el secado, volatilización, ignición y combustión. La temperatura en el espacio libre sobre el lecho está generalmente entre 850 y 950°C. En el lecho en sí, la temperatura es inferior, y puede estar alrededor de 650°C o más.

El calor producido por la combustión puede ser recuperado por dispositivos de recuperación integrados dentro del lecho fluidizado, o a la salida de los gases de combustión, o una mezcla de configuraciones.

Para residuos heterogéneos, la combustión en lecho fluidizado requiere un paso de proceso de preparación de los residuos, de modo que sean conformes a las especificaciones de tamaño. Para algunos residuos, esto puede conseguirse mediante una combinación de recogida selectiva de residuos y/o pretratamiento, como trituración. Algunos tipos de lechos fluidizados (ej. el lecho fluidizado rotativo) pueden recibir residuos de tamaños de partícula mayores que otros. En tal caso, es posible que los residuos sólo requieran una reducción somera de tamaño. [23] [25] [33]

Pueden diferenciarse las siguientes tecnologías de horno de lecho fluidizado de acuerdo con las velocidades de los gases y el diseño de la placa de boquillas:

- Lecho fluidizado estacionario (o de borboteo) (atmosférico y presurizado): Se puede observar en la Figura. Los sólidos del lecho son lo suficientemente grandes (aprox. 750 - 1000 μm) y la velocidad del gas lo suficientemente baja (1 - 3 m / s) para asegurar que todas las partículas, que constituyen el lecho, no sean arrastradas por el gas fluidificante. Por lo tanto, el lecho opera por debajo de la velocidad terminal mínima de la partícula más pequeña en el lecho. El fenómeno del "borboteo" ocurre a velocidades de fluidización superiores a las requeridas para fluidificar los sólidos dentro del lecho, con el exceso de gas por encima del requisito mínimo de fluidificación, formando burbujas. Estas burbujas de gas se unen y crecen a medida que se elevan rápidamente a través del lecho. Un lecho de borboteo se asemeja a un líquido que hierve violentamente. La presencia de burbujas en el lecho promueve la circulación intensa y la mezcla de los sólidos, lo que lleva a condiciones isotérmicas en todo el lecho.

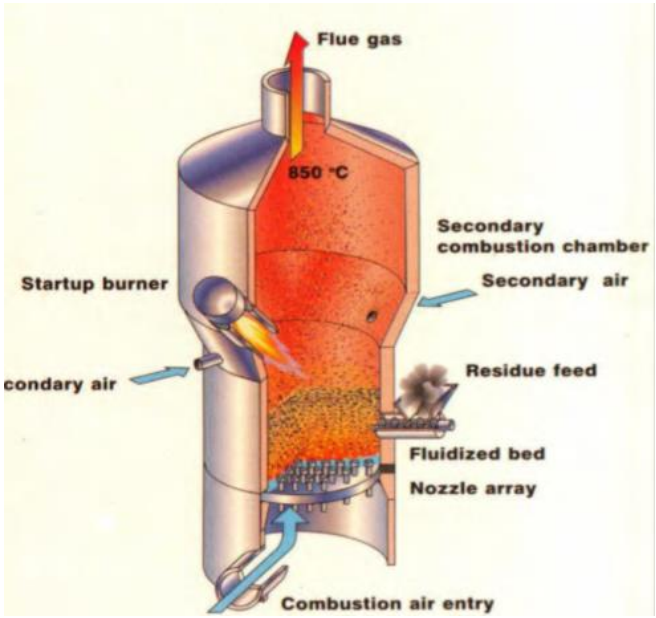

Figura 21. Lecho fluidizado estacionario o de borboteo

- Lecho fluidizado circulante: Se muestra en la Figura 22. En este caso, las mayores velocidades de los gases en la cámara de combustión son responsables de la retirada parcial del combustible y del lecho. A medida que la velocidad de fluidización en un lecho fluidizado burbujeante aumenta lentamente, la fase de burbuja desaparecerá, lo que llevará a un estado de uniformidad, denominado estado turbulento. Si la velocidad del gas excede la velocidad de transporte de las partículas, entonces, en ausencia de reposición de sólidos, la columna que contiene las partículas se vaciará rápidamente. Sin embargo, si los sólidos expulsados del lecho se capturan en un ciclón y se devuelven a través de un tubo vertical al fondo del lecho, entonces es posible mantener una concentración de sólidos relativamente grande en la columna. Los incineradores de lecho fluido utilizan partículas más pequeñas (aprox. 250 µm) y velocidades de gas más altas (5 - 6 m / s) que el de borboteo.

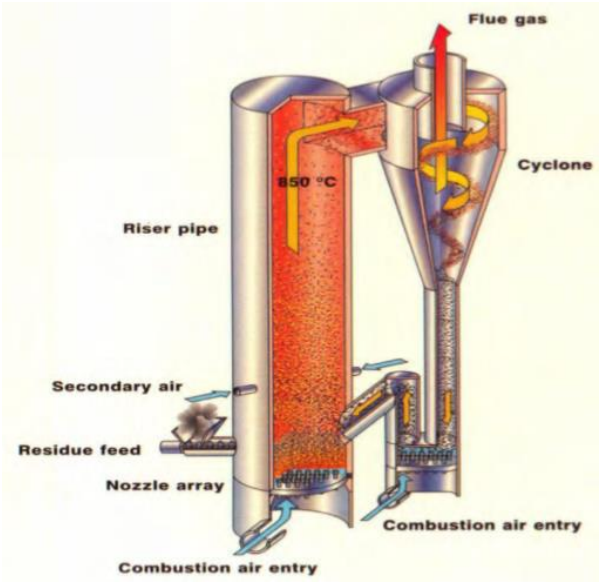

Figura 22. Lecho fluidizado circulante

- Lecho fluidizado rotativo: Se muestra este tipo de lecho en la Figura 23. El lecho se retiene dentro de la cámara de combustión como el lecho estacionario, pero se introduce la circulación dentro de éste. Esto tiene los beneficios de los altos niveles de turbulencia dentro de los lechos, pero en una cámara más pequeña. La tecnología fue desarrollada por Ebara Corporation, que ha construido más de 80 plantas en Japón que procesan RSU o RDF [19].

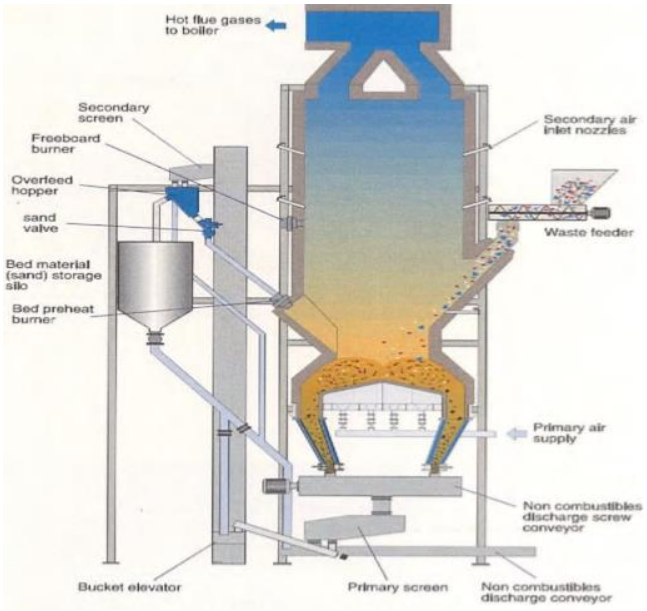

Figura 23. Lecho fluidizado rotativo

1.2.3 Recuperación de energía

La mayoría de la energía producida durante la combustión se transfiere a los gases de combustión.

En plantas de incineración de residuos, la caldera tiene dos funciones interconectadas: enfriar los gases de combustión y transferir el calor de los gases de combustión a otro líquido, normalmente agua que, casi siempre, se transforma en vapor dentro de la caldera.

Las características del vapor (presión y temperatura) o del agua caliente vienen determinadas por los requisitos energéticos y restricciones operativas locales.

El diseño de la caldera dependerá principalmente de estas características del vapor, y de las del gas de combustión (potenciales de corrosión, erosión y ensuciamiento).

Las características del gas de combustión, por su parte, dependen mucho del contenido de los residuos. En ocasiones, existen concentraciones muy elevadas de sustancias corrosivas (ej. cloruros) en el gas crudo. Esto tiene un impacto significativo en las posibles técnicas de recuperación de energía que se emplean. En particular, la caldera puede sufrir una corrosión significativa, por lo que es posible que haya que reducir las presiones de vapor con tales residuos.

Las paredes de agua de la cámara de combustión, que están hechas de tubos de intercambio de calor rellenos de agua, normalmente con un recubrimiento protector de algún tipo, se utilizan ampliamente para enfriar los gases de combustión en los pasos vacíos de la caldera (es decir de los haces tubulares de intercambio de calor).

Un sistema típico de recuperación de calor incluye:

- Una sección radiante donde el calor se recupera por transferencia de calor por radiación desde la zona de la llama en el horno. El mecanismo de transferencia de calor no se basa en la transferencia de calor por convección en este punto. Es posible tener el sobrecalentador que se ve más adelante en esta sección del horno.
- La sección de convección donde los tubos de la caldera son perpendiculares a la dirección del flujo. Esta sección recupera la mayoría del calor disponible y produce vapor saturado.
- La sección del economizador, que se coloca después de la sección de convección, y es similar en construcción a ésta Esta sección funciona a una temperatura más baja generalmente para calentar el agua de alimentación de la caldera hasta una temperatura próxima al punto de ebullición.
- La sección del sobrecalentador, que se utiliza para agregar calor adicional al vapor generado en la sección de convección del horno. Se puede colocar antes de la sección de convección o antes de la sección del economizador. La selección de la ubicación es una función del flujo de masa y la cantidad de energía que el diseñador desea eliminar de la corriente de gas. [33]

Una característica de la incineración de residuos es la elevada carga de polvo en los gases de combustión. Hay medidas que pueden facilitar la eliminación del polvo en las zonas de calderas mediante la separación por gravedad de la ceniza volante, estas son bajas velocidades del gas de combustión, y curvas en el recorrido del gas.

La elevada proporción de ceniza en los gases de combustión produce un riesgo correspondiente de alta contaminación de las superficies de transferencia de calor. Esto produce un declive en la transferencia de calor y por consiguiente una pérdida de rendimiento. Por ello, la limpieza de la superficie de transferencia desempeña un papel importante. Esta limpieza puede realizarse manual o automáticamente con lanzas (aire comprimido o chorro de agua), con agitadores, con soplantes de hollín con uso de vapor, con chorreo con pellets (a veces limpieza por granallado), con ondas de sonido y de choque, o con dispositivos de limpieza de tanques. [17]

1.2.3.1 Tipos de configuración de calderas

En las plantas de incineración de residuos suelen usarse dos conceptos de calderas:

- Calderas de disposición horizontal: Es la que se muestra en la Figura 24. Se caracterizan por el hecho de que el gas de combustión en las superficies de calentamiento por convección se desplaza horizontalmente.

  Una de las ventajas del diseño horizontal es que las superficies de calentamiento pueden limpiarse por medio del llamado dispositivo de golpeo que, a diferencia de los sopladores de hollín de vapor tradicionales, no consume vapor.

  Otra ventaja del diseño horizontal es que el soporte para las superficies de calentamiento se puede colocar fuera del gas de combustión. Grandes vigas de acero se pueden utilizar como soporte, lo que hace posible diseñar calderas más grandes.

  En lo que se refiere a la limpieza de la superficie de calentamiento por convección, el diseño horizontal significa que la suciedad producida durante el proceso de limpieza ingresa directamente a las tolvas de recogida sin pasar por otras superficies de calentamiento en su camino, lo que reduce el riesgo de bloqueo de los haces de tubos y esto resulta en una mejor disponibilidad.

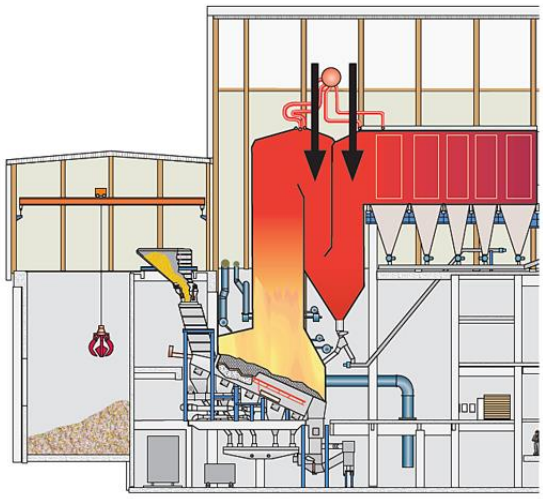

Figura 24. Incinerador con caldera horizontal

- Calderas de disposición horizontal: Se muestra en la Figura 25. Es característico este tipo de calderas que los gases de combustión en las superficies de calentamiento por convección viajan en dirección vertical.

  Las superficies de calentamiento por convección en este tipo de caldera generalmente se limpian con sopladores de hollín. La limpieza con sopladores de hollín es muy efectiva y minimiza el riesgo de bloqueo de los haces de tubos. Para evitar la erosión inducida por el soplador de hollín, los tubos calientes (es decir, los tubos del sobrecalentador y del evaporador) están protegidos por carcasas de acero inoxidable.

  Una de las ventajas del tipo de caldera vertical es que se pueden diseñar calderas muy compactas porque las superficies de calentamiento vertical pueden usar una tolva común para la extracción de cenizas, optimizando así el rendimiento por tonelada de acero en la caldera. La disposición de los tubos significa que los haces de tubos no necesitan drenajes separados, una ventaja importante en términos del tiempo requerido para reemplazar los paquetes.

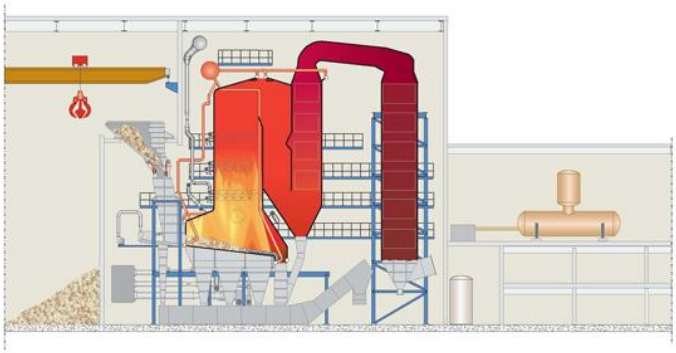

Figura 25. Incinerador con caldera horizontal

1.2.3.2 Usos de la energía recuperada

Los principales usos de la energía transferida a la caldera son:

- Producción y suministro de agua caliente (como vapor o agua caliente)
- Producción y suministro de electricidad
- Combinaciones de los anteriores

La energía transferida puede utilizarse in situ (en sustitución de energía importada) y externamente.

Normalmente, el calor y el vapor se utilizan para sistemas de calefacción industrial o centralizada, calor y vapor para procesos industriales, y ocasionalmente para el funcionamiento de sistemas de refrigeración y aire acondicionado.

La electricidad se suministra normalmente a redes de distribución nacional o se utiliza dentro de la instalación.

La tabla 2 muestra rangos aproximados de las eficiencias potenciales en plantas de incineración en una variedad de situaciones. En este caso las cifras no tienen en cuenta las eficiencias de las calderas (normalmente las pérdidas son de ~ 20 %)–, lo que explica por qué en algunas circunstancias se observan cifras cercanas al 100 % (en algunos casos se indican cifras de más del 100 %).

Tabla 2. Eficiencias potenciales de conversión de energía para distintos tipos de plantas de incineración de residuos [38]

Tipo de planta	**Eficiencia térmica potencial reportada % [(calor+electricidad) / producción de energía de la caldera]**
Generación de electricidad solo	17-30
Plantas de cogeneración y electricidad	70-85
Estaciones de calefacción con venta de vapor y/o agua caliente	80-90
Venta de vapor a grandes plantas químicas	90-100
Plantas de cogeneración y calefacción con condensación de la humedad en el gas de combustión	85-95
Plantas de cogeneración y calefacción con condensación de humedad y bombas de calor	90-10

A la hora de elegir el diseño del ciclo energético se han de tener en cuenta factores como:

- Cantidad, calidad y disponibilidad de los residuos
- Posibilidades de venta de calor a comunidades, a industrias privadas o uso como consumo propio.
- Posibilidades de consumo propio de electricidad en la planta
- Precios de la electricidad

- Duración de contratos de suministros o posibles subvenciones
- Condiciones locales como los medios de refrigeración disponibles (agua o aire), las condiciones meteorológicas, la aceptabilidad de penachos o de ruidos, el espacio disponible, etc.

1.2.4 Sistemas de Tratamientos de Gases de Combustión

Las emisiones gaseosas están consideradas como la principal fuente de contaminación potencial que existe en una incineradora. Los agentes contaminantes que pueden encontrarse en los gases de combustión son los compuestos de cloro, los de flúor, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, sustancias orgánicas, partículas, metales pesados y dioxinas y furanos. También se han de considerar las partículas sólidas.

Los sistemas de Tratamiento de Gases de Combustión (TGC) se componen de una combinación de equipos individuales que en conjunto componen un sistema de tratamiento global para los gases de combustión. Por tanto, debe considerarse siempre el sistema de depuración como una unidad, ya que existen técnicas que depuran varios contaminantes a la vez y unas son complementarias de otras o las condicionan.

Tabla 3. Comparación de regulación de emisiones en diferentes países [32]

Regulación de emisiones		**EU**	**China**	**Japón**	**Corea**
Contaminante	**Unidades**				
CO	mg/Nm^3	50		150	50
SO_2	mg/Nm^3	50			30
NOx	mg/Nm^3	200	400	250	80
HF	mg/Nm^3	1			
HCl	mg/Nm^3	10	75		30
Partículas	mg/Nm^3	10	80	40	30
Dioxinas y Furanos	ng/Nm^3	0.1	1	0.1	0.1
Hg	mg/Nm^3	0.05	0.2		0.1
Cd+Ti	mg/Nm^3	0.05	0.1		0.02
Otros metales	mg/Nm^3	0.5			1.6
VOC	mg/Nm^3	10			

Las técnicas utilizadas comúnmente son:

- Técnicas para la reducción de partículas
- Técnicas para reducir los gases ácidos
- Técnicas para la reducción de las emisiones de óxidos de nitrógeno
- Técnicas para la reducción de mercurio
- Técnicas para la reducción de compuestos carbonatados
- Técnicas para la reducción de metales pesados

Una apropiada selección y combinación de diferentes técnicas de estos grupos permiten diseñar el sistema de depuración apropiado a la corriente de gases a tratar y a los límites de emisión planteados como objetivos inmediatos y futuros. En la Tabla 3, se muestran los límites establecidos por las leyes en diferentes países y de Europa, en este último caso según la Directiva 2000/76/CE.

1.2.4.1 Técnicas para la reducción de partículas

Dentro del término partícula, se puede considerar las cenizas volantes y los finos arrastrados en el horno, los componentes condensados y los reactivos y productos de reacción formados como consecuencia de los compuestos empleados en equipos de depuración para otros contaminantes. La propia caldera de recuperación constituye un elemento de eliminación de partículas que, se puede complementar principalmente con alguno de estos tres equipos:

- Filtros de mangas: Un filtro de mangas consiste en una serie de bolsas de filtro que capturan partículas. El gas de combustión entra en la base del filtro y fluye a través de las bolsas individuales. Como se puede observar en la Figura 26, las partículas se depositan en el exterior de la bolsa y el gas limpio fluye y sale por la parte superior de la unidad.

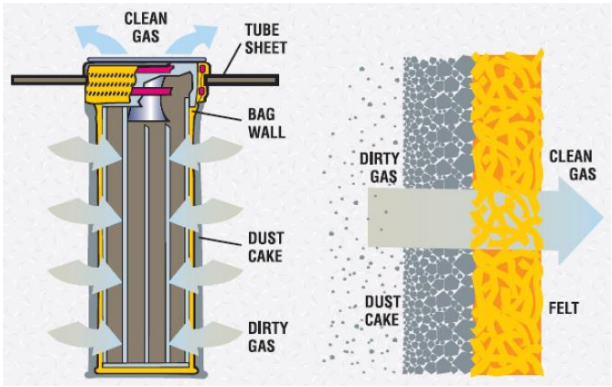

Figura 26. Esquema de funcionamiento de una bolsa.

En funcionamiento continuo, hay una 0.1pérdida gradual de presión a través del medio filtrante debido al depósito de partículas. Cuando s0.05e utilizan sistemas de sorción seca, la formación de una torta en el medio ayuda a facilitar la eliminación de ácidos. Por lo tanto, por lo general, se ubican en la parte posterior del sistema TGC aguas abajo del absorbedor de gases ácidos.

En general el diferencial de presión a través del filtro se utiliza para monitorizar la necesidad de limpieza. La sustitución periódica será necesaria cuando se alcance la vida útil residual o en caso de

daño irreversible (ej. puede producirse una pérdida de presión creciente debido a un depósito irreversible de polvo fino en el material de filtro). Varios parámetros ayudan a controlar la vida útil de las mangas: variación de la caída de presión, análisis visual o microscópico, etc. Las posibles fugas en el filtro de mangas también se detectan por el aumento de las emisiones o por ciertos trastornos en el proceso. [17] [20]

- Precipitadores electrostáticos: Los precipitadores electrostáticos (PE) se han utilizado durante muchos años en plantas de combustión, a menudo como el único sistema de control de la contaminación en incineradoras más antiguas. Como se puede observar en la Figura 27, un PE se basa en dos placas colectoras paralelas al flujo de gas de combustión, con cables o electrodos cargados colgados verticalmente en la corriente de gas. Los electrodos cargan las partículas en el flujo de gases de combustión, y las partículas cargadas son atraídas a las placas colectoras. [20]

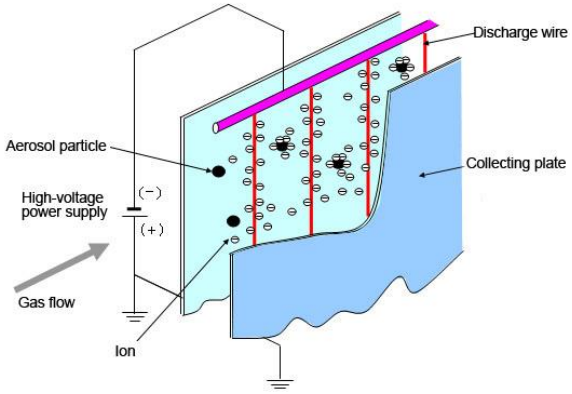

Figura 27. Principio de funcionamiento de un precipitador electrostático [39]

La eficiencia de la eliminación de polvo de los precipitadores electrostáticos depende principalmente de la resistividad eléctrica del polvo. Si ésta aumenta a valores de aprox. 10^{11}-10^{12} Ωcm, las eficiencias de eliminación se ven reducidas. La resistividad de la capa de polvo se ve influida por la composición de los residuos. Por ejemplo, el azufre contenido en los residuos o un contenido de agua a temperaturas operativas inferiores a 200°C suele reducir la resistividad de la capa de polvo por la presencia de SO2 (SO3) en el gas de combustión y por consiguiente facilita su deposición en el campo eléctrico. [23]

Para la deposición de polvo fino y aerosoles, las instalaciones que mantienen el efecto del campo eléctrico mediante la formación de gotas en el gas de combustión pueden aumentar la eficacia de eliminación. Estos tipos de PE pueden ser los precipitadores electrostáticos húmedos, precipitadores electrostáticos de condensación, lavadores Venturi electrodinámicos, o enfriadores por pulverización ionizados.

Las temperaturas operativas típicas para precipitadores electrostáticos son de 160-260°C. El funcionamiento a temperaturas más altas suele evitarse, ya que puede aumentar el riesgo de formación de PCDD/F. [17] [20]

- Ciclones: En los ciclones se induce una elevada velocidad angular al gas a depurar, generando una fuerza centrífuga en las partículas suspendidas muy superior a la fuerza gravitacional. Las partículas sedimentan en sentido radial y se separa del flujo de gas que es extraído del ciclón en sentido vertical ascendente, a través de una espiral concéntrica. Este principio de funcionamiento de puede observar en

la Figura 28.

Los sólidos descienden en movimiento helicoidal por las paredes del cono para decantar o bien en una tolva colectora, o bien a depósito de sedimentación, alejando el polvo lo máximo del vórtex de gas central. En general, el rendimiento del ciclón es función de la velocidad de entrada del gas y de la superficie de decantación. [40]

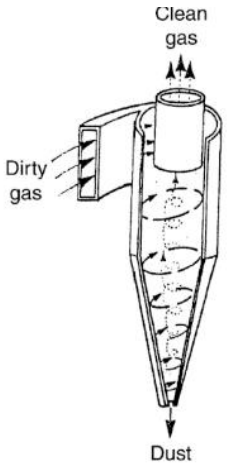

Figura 28. Flujo de gases y partículas en un ciclón

Los ciclones por sí mismos no pueden alcanzar los niveles de emisiones que se aplican en la actualidad a las modernas incineradoras de residuos. No obstante, pueden tener un importante papel cuando se aplican como etapa previa de eliminación de polvo antes de otras etapas de tratamiento de gases de combustión. [23]

1.2.4.2 Técnicas para la reducción de gases ácidos

Los tres principales componentes ácidos son SO_2, HCl (compuestos inorgánicos con cloro) y HF (compuestos inorgánicos con flúor). Estos componentes gaseosos son eliminados de los gases de combustión mediante la inyección de agentes de sorción química o física, que entran en contacto con el gas de combustión.

Los principales procesos de limpieza de gases ácidos son:

- Sistemas secos: Se muestra un diagrama típico de este proceso en la Figura 29. Consisten en la introducción de reactivos sólidos básicos (normalmente cal o bicarbonato sódico) directamente en la línea justo antes del sistema de eliminación de partículas o bien en una cámara de reacción.

  Es importante que los materiales empleados tengan la granulometría y reactividad apropiada para que el tiempo de contacto no sea excesivamente grande ya que al tratarse de una reacción gas-sólido es un fenómeno lento.

  El producto resultante, sales formadas en la reacción de neutralización, es un material completamente seco y estable químicamente, lo que facilita su posterior eliminación, que normalmente se hace un filtro de mangas. A veces, el residuo recogido contiene reactivos y puede ser parcialmente recirculado. [41] [21]

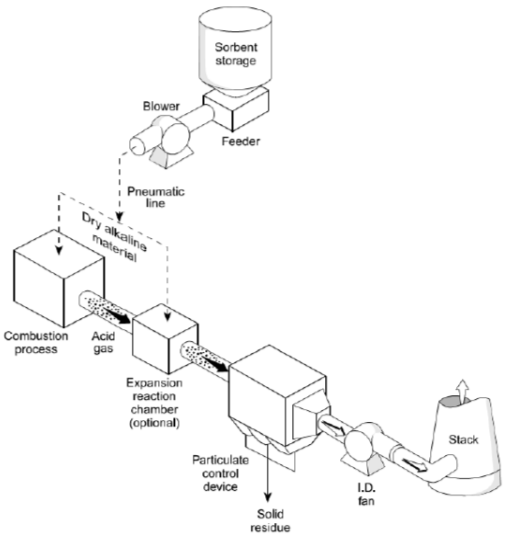

Figura 29. Sistema de inyección seca

- Sistemas semihúmedos o semisecos: En los procedimientos semihúmedos, los gases a depurar se ponen en contacto con el agente neutralizante en forma de lechada que contiene el reactivo básico. El aporte de la lechada de cal se realiza con inyectores que permiten formar una nube de gotas finas en la corriente de gas.

  Simultáneamente a la neutralización se produce la evaporación del agua empleada para formar la lechada con el consiguiente aumento de la humedad de los gases y del descenso de la temperatura. De este modo el absorbente entra en contacto con los gases de escape como un líquido con suficiente humedad para facilitar una rápida absorción de los gases ácidos, pero al mismo tiempo, al evaporarse el agua, solo forma sólidos secos que deben ser eliminados, al igual que en los métodos secos en los equipos correspondientes de retención de partículas. [18]

  En la Figura 30, se puede observar el esquema de un sistema de inyección de reactivo semihúmedo con recirculación opcional. Además del absorbedor de espray, se representa el conjunto de depósitos necesarios para la preparación de la lechada.

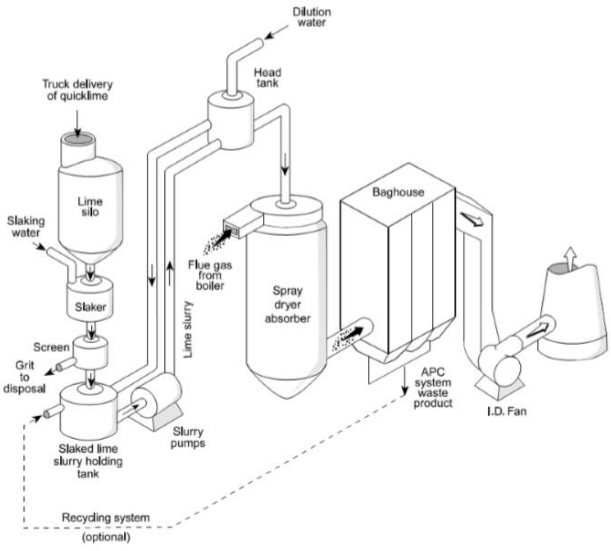

Figura 30. Sistema de inyección semihúmeda

- Sistemas húmedos: Los métodos húmedos se basan en el contacto del gas con soluciones acuosas de reactivos básicos (hidróxido sódico, hidróxido cálcico u otros) en distintas etapas. Las reacciones de neutralización en fase líquida son muy rápidas y los rendimientos elevados siempre que los equipos aporten gran área de contacto. Además, el producto de las reacciones puede clasificarse en fracciones para su reutilización.

  De este modo, HCl y HF se eliminan principalmente en la primera etapa del lavador húmedo con agua. El efluente es reciclado, con una pequeña adición de agua fresca y una purga del lavador para mantener la eficiencia de eliminación del gas ácido. En este medio ácido, la deposición de SO_2 es baja, por lo que se requiere una segunda etapa para su eliminación.

  La eliminación de dióxido de azufre se consigue en una etapa de lavado controlada a un pH casi neutro o alcalino (generalmente pH 6-7) en la que se agrega solución de sosa cáustica o lechada de cal.

  Si se utiliza lechada de cal o caliza como agente neutralizante, se acumulará sulfato (en forma de yeso), carbonatos y fluoruros como residuos insolubles en agua. Estas sustancias pueden eliminarse para reducir la carga de sal en el agua residual y por tanto reducir el riesgo de incrustación en el sistema de lavado. Es posible recuperar residuos del proceso de lavado (como yeso).

  Este riesgo no existe cuando se utiliza una solución de sosa cáustica, ya que los productos de reacción son solubles en agua.

  Si se utiliza NaOH, puede formarse CaCO3 (según la dureza del agua), que de nuevo produce depósitos en el lavador. Estos depósitos deben ser eliminados periódicamente mediante acidificación. [18] [17]

  En la Figura 31 puede observarse el diagrama de un lavador de columna rellena, divida en varias etapas, perteneciente a la planta de SYSAV en Malmo. En este caso en particular, es en la tercera etapa donde se elimina el SO_2 con la inyección de NaOH.

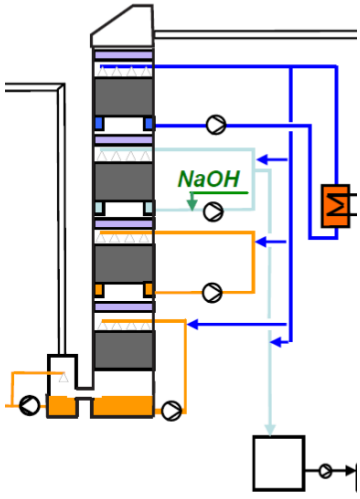

Figura 31. Columna de relleno multietapas [42]

1.2.4.3 Técnicas para la reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno (NOx) son contaminantes gaseosos que se forman principalmente a través del proceso de combustión. Mientras que el gas de combustión se encuentra dentro del horno, alrededor del 95% del NOx existe en forma de óxido nítrico (NO). El resto es dióxido de nitrógeno (NO_2), que es inestable a altas temperaturas.

Una vez que el gas de combustión se emite a la atmósfera, la mayoría del NOx se convierte finalmente en NO_2.

El NOx se puede generar de tres formas distintas:

- NOx térmicos: Durante la combustión, una parte del nitrógeno del aire es oxidada a óxidos de nitrógeno. Esta reacción sólo se produce significativamente a temperaturas por encima de 1300°C. La velocidad de reacción depende exponencialmente de la temperatura y es directamente proporcional al contenido de oxígeno.
- NOx del combustible: Durante la combustión, una pare del nitrógeno contenido en el combustible se oxida a óxidos de nitrógeno.
- Formación de NOx a través de reacción de radicales (NOX inmediatos o «prompt NOx»): El nitrógeno atmosférico también puede ser oxidado por reacción con radicales CH y formación intermedia de HCN. Este mecanismo de formación es menos importante en la incineración de residuos.

La formación de NOx térmico puede minimizarse garantizando un control cuidadoso en el horno. A estas medidas se les conocen como técnicas de primarias de reducción de NOx y se pueden usar las siguientes:

- Asegurar una buena mezcla de los residuos para que la alimentación a la cámara de combustión sea lo más homogénea posible
- Bajo exceso de aire, lo que se puede conseguir mediante la recirculación de gases de combustión, la inyección de oxígeno puro o el uso de una combustión por etapas.
- Baja temperatura en la cámara de combustión, que se puede conseguir con un suministro de aire primario y secundario bien distribuido o la inyección de agua en el horno para evitar puntos calientes en la zona de combustión primaria. [25] [20] [43]

Sin embargo, para poder cumplir los niveles establecidos por la Directiva 2000/76/CE se requiere la aplicación de técnicas secundarias que usan principalmente amoníaco o derivados de éste, como la urea, en solución acuosa para reducir el NO y el NO_2 a N_2 y agua mediante las siguientes reacciones:

$4NO + 4NH_3 + O_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O$

$2NO_2 + 4NH_3 + O_2 \rightarrow 3N_2 + 6H_2O$

$4NO + 2CO(NH_2)_2 + O_2 \rightarrow 4N_2 + 4H_2O + 2CO_2$

$2NO_2 + 2CO(NH_2)_2 + O_2 \rightarrow 3N_2 + 4H_2O + 2CO_2$

Estas técnicas son la Reducción No Catalítica Selectiva (RNCS) y Reducción Catalítica Selectiva (RCS):

- RNCS: En este tipo de proceso, el agente reductor (normalmente amoniaco o urea) es inyectado en el horno y reacciona con los óxidos de nitrógeno. Las reacciones ocurren a temperaturas entre 850 y 1000°C. Es por este rango y por la presencia de oxígeno por lo que se considera un proceso selectivo, ya el reactivo puede reaccionar con varios componentes de gases de combustión.

  El proceso SNCR convencional ocurre en el área de postcombustión en la parte superior del horno cerca de las zonas de convección, donde se ubican las boquillas de inyección de reactivo.

  Los sistemas de inyección pueden tener diferentes configuraciones, en uno o varios niveles, según los perfiles de temperatura y flujo.

- RCS: En este proceso, tras la adición del reactivo al gas de combustión, se pasa sobre un catalizador, normalmente de base metálica o cerámico, con una estructura muy poros, y con sitios activados para aumentar la velocidad de la reacción de reducción. Algunos de los más utilizados son los óxidos metálicos como el óxido de titanio (TiO_2), óxido de circonio (ZrO_2), pentóxido de vandio (V_2O_5) y óxido de silicio (SiO_2) o las zeolitas.

  El reactivo reacciona selectivamente con los gases NOx dentro de un rango de temperatura específico de 180-450°C, aunque la mayoría de los sistemas utilizados en incineradoras de residuos operan actualmente en el rango de 230-300°C. Por debajo de 250°C es necesario un mayor volumen de catalizador y hay un mayor riesgo de ensuciamiento y envenenamiento del este.

  La RCS se aplica principalmente en la zona de gas limpio, es decir, después de la eliminación de polvo y de gases ácidos, lo que provoca que los gases de combustión normalmente requieren recalentamiento hasta la temperatura de reacción efectiva. [25] [41]

  En la figura 32, se puede observar una moderna instalación RCS con varios lechos catalíticos.

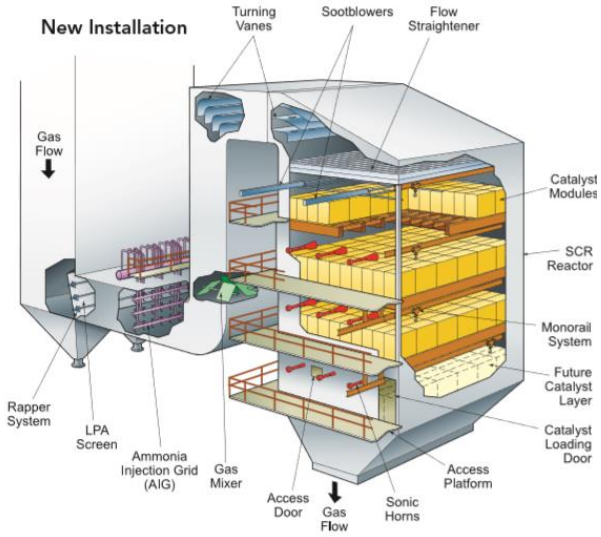

Figura 32. Sistema RCS. [44]

1.2.4.4 Técnicas para la reducción de emisiones de mercurio y metales pesados

El valor límite fijado en la directiva sobre incineración de residuos es de 0,05 mg/m^3. Pero, en algunos Estados Miembros se han fijado valores límite aún más bajos, de hasta 0,03 mg/m^3 como valor medio diario (con monitorización continua) lo que provoca que la mayoría de las instalaciones no pueden cumplir estos valores límite, particularmente para cargas máximas, sin la incorporación de medidas de limpieza de gases especiales para Hg.

Como técnica primaria se utilizan la prevención y el control del mercurio en los residuos a incinerar. Algunos métodos para lograrlo son:

- Recogida selectiva eficiente de los residuos que contienen metales pesados, como pilas, baterías, amalgamas dentales, etc.
- Notificación a los productores de residuos de la necesidad de separar el mercurio

- Identificación y/o restricción de residuos potencialmente contaminados con mercurio
- Mediante muestreo y análisis de residuos cuando sea posible
- Mediante campañas específicas de muestreo y análisis

Además, se ha de tener en cuenta que tras pasar por el horno el mercurio inorgánico (principalmente Hg2+ en forma de cloruro) y el mercurio elemental se ven afectados de forma distinta por los sistemas de TGC, por lo que se requiere una consideración detallada del destino de ambos.

La selección de un proceso para eliminación de mercurio depende de la carga alimentada y del contenido de cloro en la materia en combustión:

- Con elevados contenidos de cloro, el mercurio en el gas de combustión crudo estará progresivamente más en forma iónica, que puede depositarse en lavadores húmedos.
- El mercurio metálico puede eliminarse de la corriente de gases de combustión mediante su transformación en mercurio iónico, agregando oxidantes, y su deposición posterior en el lavador, o por deposición directa sobre carbón activado dopado con azufre, coque de horno de solera o zeolitas.

Cuando se elimina en los lavadores húmedos, el efluente posteriormente es alimentado a plantas de tratamiento de aguas residuales, con deposición de metales pesados, donde el mercurio se transformará en una forma más estable y más adecuada para su desecho final.

Otros metales pesados se depositan con la ceniza volante o se eliminan también con carbón activado. [21] [15]

1.2.4.5 Técnicas para la reducción de dioxinas y furanos (PCDD/F)

Se cree que los tres mecanismos siguientes producen la formación de dioxinas/furanos en la incineración de residuos:

- formación de PCDD/F a partir de hidrocarburos clorados que ya se encuentran o se forman en el horno (como clorohidrobenceno o clorobenceno);
- La síntesis ex Novo se produce en un intervalo de temperatura comprendido entre 200ºC y 400ºC, cuando existe una fuente de carbono y partículas con contenido metálico, que actúan como catalizadores

El principal medio de destrucción de estos contaminantes y también la de sus precursores es una combustión eficaz. Sin embargo, a pesar de conseguirse, debe esperarse una formación en cantidades, aunque muy pequeñas, suficientemente elevadas para que su valor sea superior a 0,1 ng/Nm^3, límite para estos contaminantes. Por esta razón el sistema de tratamiento de gases debe incorporar un procedimiento capaz de garantizar que las emisiones cumplen el límite establecido.

Las principales técnicas utilizadas ya se han descrito anteriormente y son los sistemas RCS con algunas adaptaciones, y la inyección de carbón activado. También se pueden usar filtros de mangas donde las fibras de las bolsas se fabriquen o se mezclen con un catalizador. [18] [25]

1.3 Mejores Técnicas Disponibles (MTD)

La Directiva 96/61/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación tiene por objeto la prevención y la reducción integradas de la contaminación procedente de las actividades que figuran en el anexo I de dicha directiva.

Esta ley proporciona una definición específica del término «mejores técnicas disponibles» y es la siguiente "la fase más eficaz y avanzada de desarrollo de las actividades y de sus modalidades de explotación, que demuestren la capacidad práctica de determinadas técnicas para constituir, en principio, la base de los valores límite de emisión destinados a evitar o, cuando ello no sea practicable, reducir en general las emisiones y el impacto en el conjunto del medio ambiente. También se entenderá por:

- «técnicas»: la tecnología utilizada junto con la forma en que la instalación esté diseñada, construida, mantenida, explotada y paralizada;
- «disponibles»: las técnicas desarrolladas a una escala que permita su aplicación en el contexto del sector industrial correspondiente, en condiciones económica y técnicamente viables, tomando en consideración los costes y los beneficios, tanto si las técnicas se utilizan o producen en el Estado miembro correspondiente como si no, siempre que el titular pueda tener acceso a ellas en condiciones razonables;
- «mejores»: las técnicas más eficaces para alcanzar un alto nivel general de protección del medio ambiente en su conjunto. [45]

La ley exige un enfoque integrado de la industria en su entorno y el conocimiento por parte de todos los implicados (industria, autoridades competentes y público en general) de las Mejores Técnicas Disponibles (MTD), con el fin de reflejar todos estos aspectos en la Autorización Ambiental Integrada que otorgan las Comunidades Autónomas.

Se establece, en el marco de la Unión Europea, un intercambio de información entre los Estados miembros y las industrias para la elección de estas MTDs que deben servir de referencia común para los Estados miembros a la hora de establecer el objetivo tecnológico de aplicación a las diferentes actividades.

A tal efecto, la Comisión Europea a través de la Oficina Europea de IPPC (European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau), ha organizado una serie de grupos de trabajo técnico que, por epígrafes y actividades, proponen a la Comisión Europea los Documentos de Referencia Europeos de las Mejores Técnicas Disponibles (BREFs).

Los BREF informarán a las autoridades competentes sobre qué es técnica y económicamente viable para cada sector industrial, en orden a mejorar sus actuaciones medioambientales y, consecuentemente, lograr la mejora del medio ambiente en su conjunto.

1.3.1 Mejores Técnicas Disponibles para Incineración de Residuos

El documento BREF para las Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos proporciona:

- Información general sobre el sector industrial en cuestión y sobre los procesos industriales utilizados en el sector.
- Datos e información sobre los actuales niveles de emisiones y consumos, reflejando la situación en instalaciones existentes en el momento de la redacción.

- Una descripción sobre la reducción en las emisiones y otras técnicas que se consideran de la máxima relevancia para la determinación de las MTD y de las condiciones de permisos basadas en las MTD. Esta información incluye los niveles de emisión y consumo considerados obtenibles con el uso de la técnica, una idea de los costes y de los efectos sobre otros medios asociados con su aplicación, así como el grado en que tal técnica es aplicable al conjunto de instalaciones que requieren permisos de IPPC, como por ejemplo instalaciones nuevas, existentes, grandes o pequeñas.
- Una presentación sobre las técnicas y los niveles de emisiones y consumos que se consideran compatibles con las MTD en un sentido general.

Algunas de las MTD genéricas para la incineración de residuos consideradas son:

- La importancia de seleccionar un diseño de instalación adecuado a las características de los residuos recibidos en la instalación en términos de sus características tanto físicas como químicas
- El establecimiento y mantenimiento de controles de calidad sobre la entrada de residuos
- Las condiciones y gestión del almacenamiento de los residuos entrantes antes de su tratamiento
- El diseño y operación de la etapa de combustión. En general, el uso de las condiciones operativas de combustión especificadas en el Artículo 6 de la Directiva 2000/76/CE (DIR). La utilización de diversas técnicas para controlar la combustión y la selección de un diseño adecuado a los residuos recibidos son de particular relevancia aquí.
- Técnicas específicas para la recuperación del valor energético del residuo
- Proceso de selección de sistemas de tratamiento de gases de combustión
- Diversas técnicas relativas al control de aguas residuales y residuos sólidos, en especial, para las cenizas de fondo.

Además de estas MTD genéricas, se identifican MTD más específicas según el tipo de residuo a procesar: residuos municipales, residuos municipales pretratados o seleccionados. residuos peligrosos, lodos de depuradora o residuos clínicos. [17]

2 OBJETIVOS Y ALCANCE

"Las palabras no son tan importantes cuando se entienden las intenciones"

Isabel Allende

Cada vez generamos más residuos, y los depósitos controlados tienen una capacidad de determinada, por ello en los últimos años está tomando fuerza el concepto de valorización de residuo, es decir, cualquier procedimiento que permita el aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos, siempre que estos procedimientos no tengan repercusiones negativas en la salud humana y en el medio ambiente.

Es aquí donde entra en juego la incineración de residuos como modo de valorización de residuo. En comparación con otros métodos de tratamiento de residuos, el tratamiento térmico proporciona una forma segura y óptima de extraer la energía y eliminar las sustancias nocivas. Es decir, se puede generar electricidad y energía térmica que puede ser sustituida por la que generan otros recursos energéticos fósiles escasos y a su vez, los contaminantes orgánicos, las toxinas y las sustancias infecciosas se destruyen efectivamente a altas temperaturas. Por estas razones, el tratamiento térmico es ahora parte de políticas ambientales sostenibles en los países desarrollados.

Por otro lado, para evitar los posibles efectos negativos sobre el medioambiente, se consta del documento BREF para las Mejores Técnicas Disponibles. Este documento es una guía para la selección de los sistemas más apropiados desde un punto de vista ambiental con la debida consideración para obtener una economía razonable. Contiene una descripción general de las técnicas aplicadas en el sector de la incineración de residuos y establece 56 recomendaciones numeradas relativas a las MTD para el diseño y la operación de plantas de residuos a energía. (63 para en caso de RSU)

El objetivo de este Trabajo de Fin de Máster es realizar un estudio básico sobre la aplicación de estas MTDs para la concepción de una planta de incineración de residuos, haciendo uso de datos reales de generación de RSU en una determinada localización. Para ello se plantean las siguientes metas:

- Realizar un análisis de las distintas tecnologías expuestas en el documento BREF sobre la combustión y el tratamiento de gases de una planta y realizar una selección de las más apropiadas para las necesidades que se exponen.
- Seleccionar las tecnologías que se encuentran actualmente en el mercado que más se ajusten a la selección anterior
- Calcular y evaluar las entradas y salidas de materias primas y residuos en la instalación propuesta.
- Calcular y evaluar las energía producida y consumida en la instalación propuesta.
- Estimar costes de operación e inversión de una instalación completa que funcionase con los equipos seleccionados

Quedan fuera del alcance de este proyecto el estudio y selección sobre procesos, anteriores al proceso de combustión y TGC, como puede ser el tratamiento y almacenamiento de los residuos, y procesos posteriores, como pueden ser los tratamientos de residuos y efluentes generados.

Tampoco se realizan diseños de los equipos seleccionados.

3 ELECCIÓN DE EQUIPOS

"Tenemos toda la tecnología del mundo a nuestra disposición y vamos en un Ford GTI de mierda"

Will Smith (Men in Black)

En este capítulo vamos a describir cómo se ha llevado a cabo la elección de los principales equipos que van a conformar la planta de incineración de RSU. Como se ha especificado anteriormente esta elección se hará según las pautas indicadas por el capítulo 5 del documento BREF. De este modo, partiendo de unos datos de partida con características y cantidades de combustible, aplicando las MTD, y en caso de que la elección de una técnica u otra se ajusten a las especificaciones de estas MTD, analizando las ventajas y desventajas de las técnicas en cuestión, se llegará a la elección de una serie de tecnologías y equipos en el mercado.

3.1 Datos generales de la planta y el Residuo

Para este trabajo se han tomado como referencia los residuos sólidos urbanos procedentes del del Centro Integral de Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos Montemarta-Cónica perteneciente a ABOGARSE, cuya caracterización como combustible ha sido llevada a cabo por el Departamento de Ingeniería Química y Ambiental dentro del proyecto "Proyecto estudio de las características combustibles de residuos sólidos urbanos y sus fracciones".

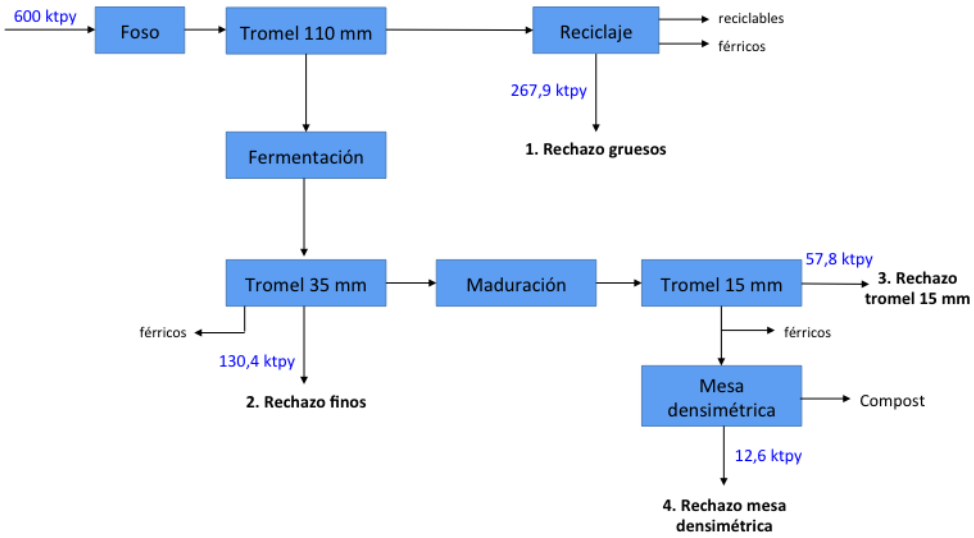

Figura 33. Esquema tratamiento Centro Integral de RSU Montemarta-Cónica

Las muestras y fracciones del RSU, tomadas de distintas zonas de la planta, que se pueden observar en la Figura 33, son las siguientes:

1. Rechazo gruesos: procede del rechazo del trómel de 110 mm al que se le han eliminado las fracciones reciclables y férricas.
2. Rechazo finos: procede de la fracción fina del tromel de 35mm y al que se le ha eliminado la fracción férrea.
3. Rechazo trómel 15 mm: tras un proceso de maduración se hace pasar los residuos por un trómel de 15 mm.
4. Rechazo mesa densimétrica: constituye la fracción fina del trómel de 15 mm al que se le han retirado los materiales férricos.

Estas muestras fueron sometidas a tratamientos similares para proceder a su caracterización. Se les determinó la humedad a 105ºC y cenizas a 750ºC (temperatura típica para carbón). El análisis de mayoritarios ofrece el contenido en carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre, cloro y oxígeno. Además, se determinó el poder calorífico superior e inferior del residuo.

El combustible que será la alimentación a nuestra instalación de valorización energética de RSU será la mezcla y suma de las corrientes 1-4 que hacen un total de 468.700 t/año. Las características de esta alimentación se han determinado como una media ponderada con los flujos de las propiedades medidas a cada corriente. En la Tabla 4 se muestra las principales características del RSU para ser usado como combustible, en la Tabla 5 se recoge composición de elementos mayoritarios y en la Tabla 6 se puede observar la composición de elementos minoritarios.

Tabla 4. Características de la corriente de RSU a incineración

Característica	**Valor**
Combustible a incineración (t/año)	468700
Humedad total (% p/p)	40,35
PCS (MJ/kg)	16,75
PCI (MJ/kg)	15,65

Tabla 5. Composición de mayoritarios de la corriente de RSU a incineración

Componente	**% p/p**
C	39,03
H	5,14
N	0,46
S	0,14
Cl	0,11
O	23,13
Cenizas a 750ºC	32,00

Tabla 6. Composición de minoritarios de la corriente de RSU a incineración

Componente	**mg/kg**
Al	25928,36
Ca	313781,42
Fe	39526,12
K	14505,63
Mg	15146,36
Mn	428,32
Na	19353,86
P	9457,61
S	22459,70
Cu	1231,73
Mo	30,02
Ti	11928,48
Ni	188,04
Si	178498,50

3.2 Sistema de combustión

Entre la multitud de tecnologías disponibles: tecnología de parrilla, hornos rotativos, lechos fluidizados, solera, gasificación, etc. Para las condiciones dadas y según el documento BREF, en particular, la comparación que muestra los factores que afectan la aplicabilidad y la idoneidad que se pueden encontrar en el Anexo I de este proyecto, se ha decidido que la técnica más apropiada a utilizar sería la tecnología de parrilla. Varios son los motivos que han ayudado a decantarse por esta técnica:

- Para RSU y un PCI de 15,6 MJ/kg, la lista de selección se reduce a parrillas, lechos fluidizados, hornos oscilantes y tambores de pirólisis, de éstas la más ampliamente aplicada para RSU en la tecnología de parrilla, en especial, la de parrilla reciprocante, siendo ésta una tecnología robusta y con bajos costes de mantenimiento. Hornos oscilantes y tambores de pirólisis se aplican raramente.
- La alimentación de combustible a nuestra planta de incineración es de 58,5 t/h. Las tecnologías de parrillas pueden llegar a admitir hasta 50 t/h, pero el rango más común es entre 5 y 30 t/h. Según esto, nuestra panta podría funcionar con 2 líneas con incineración mediante parrillas móviles, mientras que, para otras tecnologías, horno oscilante (1- 10 t/h) o lecho fluidizado (hasta 20 t/h), tendríamos que

utilizar al menos tres líneas para el caso de los lechos fluidizados y 6 líneas para el caso de los hornos oscilantes, lo que hace a este último tener un mayor coste específico de inversión debido a esta menos capacidad.

La Figura 34 proporciona un rango de capacidad de procesamiento para tres tecnologías basadas en plantas operativas actuales.

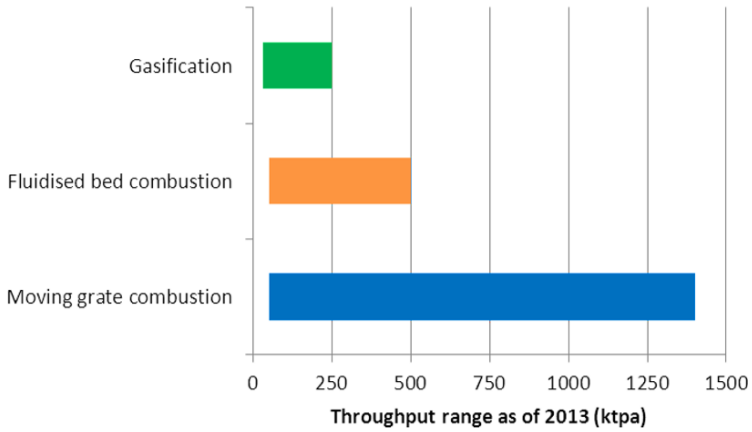

Figura 34. Capacidad de procesamiento por tecnologías [19]

- Otra de las ventajas, con respecto a los lechos fluidizados, es que no se requiere un tratamiento previo de los residuos, lo que se traduce en un menor coste inversión.

  En nuestro caso en particular, las partículas del rechazo del trómel tienen un tamaño de 110 mm y esta corriente, según se observa en las cantidades de la Figura 33, representa más del 50% de la alimentación.

  Se recomienda que la alimentación a un reactor de lecho fluidizado no exceda los 50 mm, por tanto, para instalar este tipo de reactor se haría necesario el sistema de tratamiento previo.

Estas son las principales ventajas de las tecnologías de parrilla con respecto a las otras, sin embargo, son varios tipos de parrilla los que existen como se ha visto en el capítulo 1, de los que se ha elegido el de parrilla reciprocante por ser el más utilizado actualmente, presentando como principal ventaja un mejor transporte y control de los residuos a incinerar a través del horno.

Además, se ha de seleccionar el tipo de refrigeración que van a tener, por aire o por agua. Según el PCI de nuestro combustible, ambas técnicas podrían ser aplicadas, sin embargo, las MTD específicas para incineración de RSU, señalan que el diseño debe incorporar suficiente refrigeración para permitir la variación del aire primario con el fin de controlar la combustión y no para enfriamiento de la parrilla. Para este fin, las parrillas refrigeradas por agua son más adecuadas.

Una vez se tiene definida la MTD para la combustión, se procede a buscar una solución en el mercado que se ajuste a los detalles anteriormente expuestos. Varios son los fabricantes que disponen de este tipo de tecnología como Martin, con más de 300 plantas en el mundo, Kepple Seggers con casi 40 instalaciones o Hitachi Zosen Inova con cerca de 500, entre otras. Sin embargo, en este proyecto la tecnología que se ha seleccionado, no solo para la parte de incineración, sino también para el resto de equipamiento, ha sido la que proporciona Babcock & Wilcox Volund (B&W Volund). Esta compañía lleva desde 1930 desarrollando plantas de producción de energía a partir de residuos, diseñando y construyendo más de 560 líneas de producción, de las cuales un número considerable de ellas aún están en uso. Desde 1995 hasta hoy se han puesto en funcionamiento más de 90 incineradoras de residuos, de las cuales 20 de ella incorporan parrillas refrigeradas por agua, con capacidades de hasta 38 t/h por líneas.

Dynagrate es el nombre comercial de la parrilla de B&W Volund. Esta parrilla se basa en 40 años de investigación, teniendo como principal características su excelente rendimiento y los bajos costes de mantenimiento.

Como se puede ver en la figura 35. La parrilla se asemeja a una escalera. Las barras de la parrilla se colocan alternativamente horizontal y verticalmente. Estas barras están montadas en ejes y, como las barras en un eje interfieren con las barras del eje adyacente, se forma una alfombra continua. Cuando los ejes giran 60 grados en direcciones opuestas durante el movimiento de la parrilla, los pasos están cambiando de vertical a horizontal y de horizontal a vertical.

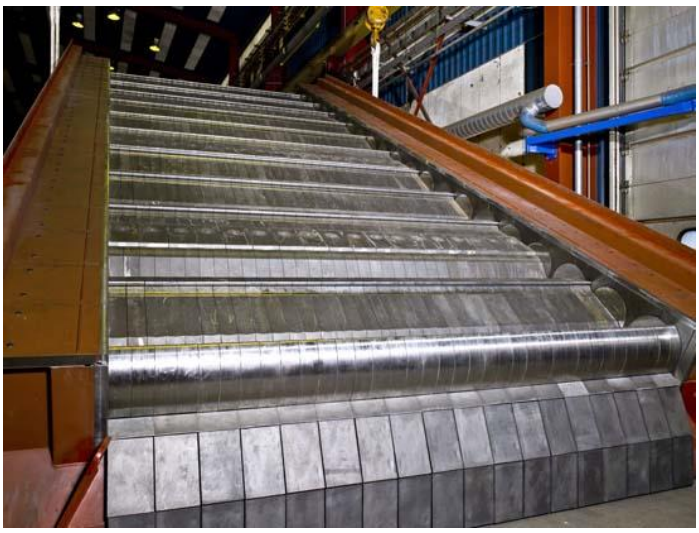

Figura 35. Parrilla Dynagrate

Este cambio de los pasos de horizontal a vertical y viceversa produce un movimiento longitudinal. Esto produce una óptima rotación y distribución que aseguran el secado, el transporte y la combustión del lecho de RSU.

El mecanismo de accionamiento, que está situado fuera del horno, proporciona un espacio constante de 2 mm entre barras de parrillas sucesivas en todas las posiciones del eje. Es a través de este espacio de 2 mm por donde se inserta el aire de combustión. Y el movimiento constante asegura que estos huecos estén siempre limpios y libre de partículas.

La rejilla consiste en módulos que se pueden combinar con barras de diferentes longitudes y anchuras. Estos módulos pueden operarse independientemente uno de otro.

El enfriamiento por agua de la parrilla permite que el operador pueda inyectar aire de combustión cuando se considere necesario, y también puede reducir la inyección del aire de combustión a cero en ciertas áreas porque el agua está enfriando, y el aire se usa para la combustión únicamente. Por la misma razón, el precalentamiento del aire de combustión se convierte en una opción muy flexible que puede usarse para mejorar y optimizar la combustión.

Las principales características y ventajas de este tipo de hornos son las siguientes:

- Combustión de todo tipo de residuos no tratados.
- Combustión uniforme y eficiente, típicamente menos del ¼% del carbono orgánico total en contenido de ceniza
- Control de combustión único y respuesta rápida.
- Sin contacto entre las barras de rejilla y los revestimientos laterales por lo lo que limita el uso y desgaste, reduce las fuerzas mecánicas a las que está expuesta la parrilla durante la operación y no hay problema

con la fusión de metales, como se ve en las rejillas clásicas de avance / retroceso.

- La capacidad es de 4 - 55 t / h
- Adecuado para desechos de alto poder calorífico hasta 25 MJ / kg
- La operación con un bajo de exceso de aire significa que el enfriamiento de la parrilla de combustión es independiente del aire primario , existirá una alta eficiencia térmica y una baja formación de NOx.
- Larga vida útil, menos desgaste de piezas y menores costes de mantenimiento, gracias al flujo constante de agua a traves de las barras que se muestran en la Figura 36, que proporciona una baja diferencia de temperatura a lo largo de la parrilla, evitando posibles evaporaciones locales y teniendo por tando un menor estrés térmico.

Figura 36. Eje con refrigeración integrada

A la hora de la elección de la geometría del horno, se ha de elegir entre la configuración de flujo paralelo, que según el documento BREF, son adecuadas para residuos de alto poder calorífico, o de flujo central que son adecuados para todo tipo de residuos.

A priori, el primer tipo mencionado puede parecer el que más se ajuste, sin embargo, cuando se acude a las características del fabricante, especifican que las de flujo central son óptimas para combustibles con alto poder calorífico. Por tanto, a igualdad de condiciones con respecto a este punto, se ha optado por la opción cuyo diseño y construcción es menos complicado, que es el de flujo central.

3.3 Sistemas de tratamiento de gases de combustión

A la hora de diseñar el sistema de tratamiento de gases de combustión (TGC) la principal premisa ha sido la minimización general de la demanda de energía, siempre y cuando se cumpla en nivel de eficacia ambiental requerido.

Por tanto, han existido casos en la que la selección no supuesto ninguna duda, y otras en las que, ante la paridad respecto al tema energético, se ha tenido que decidir mediante otros criterios como pueden ser la eficiencia de eliminación, el consumo de reactivos, producción de residuos o costes de inversión entre otras.

A continuación, se detalla la elección de cada técnica del sistema TGC, que se compondrá de un sistema de eliminación de NOx por Reducción no Catalítica Selectiva (RNCS), un precipitador electrostático, un sistema de eliminación de gases ácidos semihúmeda.

3.3.1 Reducción de las emisiones de NOx

Para este caso, en sistema elegido ha sido en del Reducción Catalítica no Selectiva (RNCS) frente a una Reducción Catalítica Selectiva (RCS). Esto ha sido así debido principalmente a los siguientes motivos:

- El consumo energético del RNCS es menor que el RCS. Este puede llegar a consumir en torno a 30-50 kWh menos por tonelada de residuo de entrada de energía térmica. Además, la RCS no tiene un consumo eléctrico adicional debido a la caída de presión en el lecho catalítico.
- Costes operativos y costes de inversión son bastante menores en el caso de la RNCS.

En general, el uso de RCS se aconseja y puede ser MTD cuando se requieren altas eficacias de eliminación de NOx y una baja concentración de estos componentes en los gases de combustión.

Las tecnologías de combustión existentes en el mercado y el control que se ejerce sobre esta combustión, además de posibles técnicas primarias de reducción de NOx que se puedan utilizar, hacen que la concentración de NOx en los gases de combustión, se encuentren a la salida del horno cerca de los límites establecidos por la Directiva 2000/76/CE de 200 mg/Nm^3 (valor medio diario). Esto ocurre así en las modernas plantas de incineración de Volund, siendo el propio fabricante en que desaconseja el uso de RCS excepto para casos especiales.

Al igual que en el caso del sistema de combustión, para la reducción de contaminantes, tanto en este caso el NOx, como para el resto, se ha optado por sistemas fabricados por B&W.

En el caso de sistemas primarios de reducción de NOx, previos al tratamiento RNCS, hay que destacar VoluMix™, un sistema que asegura un buen mezclado turbulento de los gases, dando lugar a una mejor combustión, es decir, es una medida primaria de reducción de óxidos de nitrógeno. Este sistema está basado en modelos de Fluidodinámica computacional (CFD), que ofrecen avanzadas herramientas de cálculo de flujos tridimensionales con transferencia de calor y masa.

Según se observa en la Figura 37 y 38, con Volumix el aire secundario es introducido en las zonas de combustión en diferentes lugares a distintas velocidades y ángulos. Esto se hace mediante boquillas de inyección que empujan los gases creando vórtices. Con esto se consigue una rápida velocidad de inyección de oxígeno y una temperatura uniforme del gas en todo el horno.

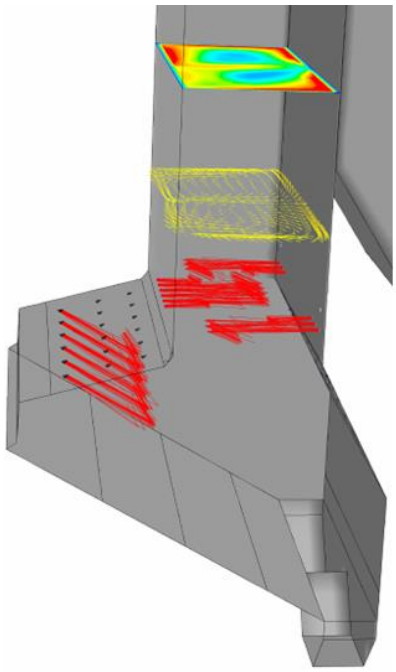

Figura 37. Distribución de la inyección de aire en el horno

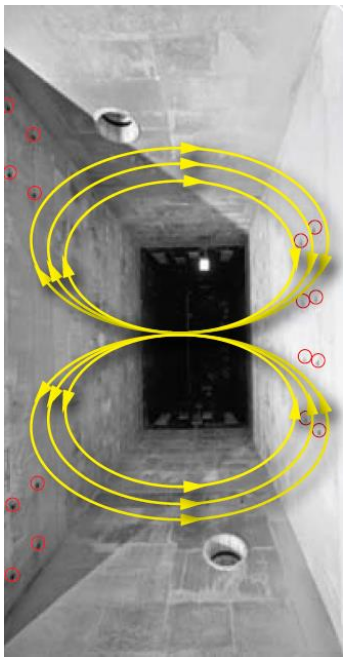

Figura 38. Interior de Horno Dynagrate

Los inyectores en el techo de la parrilla están dispuestos con el propósito de mover el gas hacia el frente y para que pueda penetrar en la capa caliente sobre las rejillas en la parte central. El propósito de los inyectores en la pared trasera es crear turbulencia en la entrada a la cámara de post combustión y aspirar los gases de combustión calientes desde la parrilla. Los inyectores que están dispuestos de forma opuesta permiten para lograr muy buenas características de mezcla, suministro de oxígeno y turbulencia. [32]

La reducción de NOx por el uso de este sistema se consigue gracias a que se evitan picos de temperatura en la cámara de combustión y se consigue una mejor combustión por etapas. Pero no es esta la principal ventaja, se pueden destacar además las siguientes:

- Disminuir la corrosión debido a la anulación de puntos calientes en el horno.
- Obtención de bajos niveles de CO por las óptimas condiciones turbulentas y de consumo de combustible.
- Maximización de la transferencia de calor y el tiempo de residencia.
- Gran eficiencia térmica y bajo exceso de aire.

Sólo utilizando este sistema, no existe la necesidad del uso de otras técnicas primarias como puede ser la recirculación de gases de combustión, lo que supone un ahorro en costes de inversión, de operación y de mantenimiento.

El uso de esta técnica hace que la concentración de óxidos de nitrógeno se sitúe cerca de 200 mg/Nm^3 (11 % de O_2) que junto con el un sistema SNCR puede llegar 40 – 60 mg/Nm^3. [46]

El de reducción no catalítica B&W MEGTEC ofrece una gran eficiencia, entre 60 y 80 %, con un bajo "ammonia slip" y una alta resistencia a la obstrucción gracias a los inyectores Turbotak ™, que se muestran en la Figura 36 y 40.

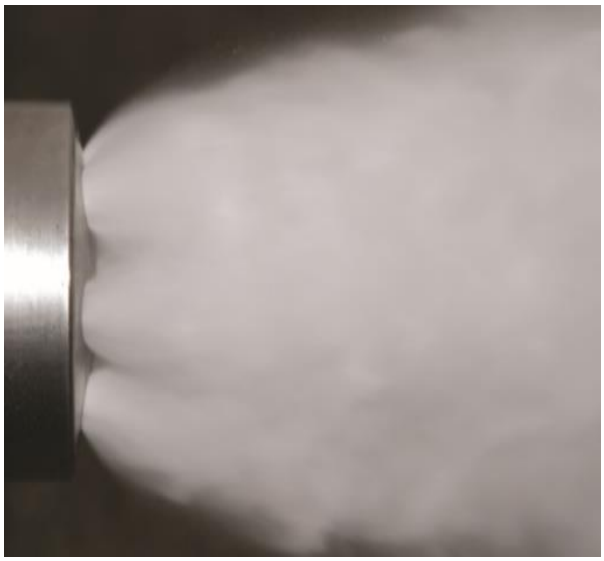

Figura 39. Pulverización de agente reductor

Figura 40. Inyectores Turbotak ™

B&W MEGTEC ofrece a sus clientes pruebas en plantas pilotos para determinar la factibilidad su sistema de reducción. Estos test se llevan a cabo para evaluar la mejor opción en cuanto a dimensionado de los equipos y localización de las inyecciones de reactivo.

Un sistema completo este compuesto por inyectores, estaciones de descarga y equipos de manipulación, tanques de almacenamiento, bombeo, contro de mezcla, dilución, y distribución, programadores/PLC y soporte técnico.

Un ejemplo de una instalación se puede observar en la Figura 41.

Algunas de las ventajas que detalla el fabricante son:

- Diseño robusto para alta temperatura, lo que ofrece un mayor rango de operación.
- El control del tamaño de gotas y del pulverizado.
- El diseño personalizado y optimizado.
- La facilidad de integración con el sistema reduce los tiempos de espera y de inactividad.

Figura 41. Control y bombeo de reactivos para reducción de NOx

Estas características también son ofrecidas por otros de los principales diseñadores de sistemas SNCR como YARA, Sefako o FLSmidth que también dispone de sus propios diseños de inyectores, sin embargo, ninguno de ellos asegura una eficiencia superior al 80 % para el caso de hornos en incineradoras de residuos. [47] [48]

Uno de los aspectos a tener en cuenta en este tipo de tratamiento es la elección del reactivo a utilizar. Los reactivos más ampliamente utilizados son amoniaco y urea. En este caso, el documento BREF no expresa de manera explícita, que el uso de un reactivo u otro suponga una mejora sustancial con respecto a términos de energía o cumplimiento de los valores de emisión de contaminantes establecidos por norma. El documento se limita a exponer las ventajas e inconvenientes entre ambos.

Lo mismo ocurre en el caso del fabricante, que no expone puntos a favor entre ambos reactivos, sino que basará su elección una vez realizadas pruebas realizadas in situ con ambas sustancias como se comentó anteriormente.

Esta mayor dificultad es debida a dos motivos:

- Ambos reactivos pueden cumplir con los niveles de eficiencia de reducción necesarios, en el caso de la urea pudiendo producir unas mayores emisiones de N_2O (25-35 mg/Nm^3) y en el caso del amoniaco, dando lugar a una mayor fuga de éste (aprox. 10 mg/Nm^3).

Esta paridad se acrecienta en los últimos años, ya que el control sobre los procesos es mucho mayor, y estos niveles pueden hacerse insignificantes en ambos casos.

- El coste de la urea es menor que el del NH_3, sin embargo, para plantas mayores este mayor coste de amoniaco se compensa con el menor coste químico (mayor eficiencia en la reducción).

Por tanto, ha sido por otros motivos, como es la seguridad, por lo que la urea ha sido el elegido, ya que los riesgos de almacenamiento y manipulación son menores que los del amoniaco. La urea a diferencia del amoniaco no es inflamable, no tiene valores limites ambientales definidos y no produce fuertes olores. [49] [41]

3.3.2 Reducción de las emisiones de partículas

Las técnicas para la eliminación de partículas son numerosas, pero son tres las más comunes, que se han tenido en cuenta y se han valorado a la hora de la elección: ESP, ciclones y filtros de manga.

También existen varios factores que pueden determinar la elección, sin embargo, al no contemplarse cálculos sobre granulometría y cantidad de partículas en este estudio, de nuevo, el principal factor por el que se tomará una decisión será la optimización energética del sistema.

En este primer caso, se considera una etapa de eliminación previa a otros sistemas de TGC. Mas adelante se evaluará la idoneidad de otra etapa final. Esta primera, se considera fundamental para reducir la cantidad de partículas que entran a equipos posteriores y para separar la ceniza volante del resto de residuos para su posible reciclado.

Por tanto, debido al uso de una etapa posterior de separación de partículas, se descarta el uso de un filtro de mangas, ya que la mayor eficiencia de separación de estos no va a ser necesaria porque con el posterior sistema se alcanzarán los límites de emisión de partículas con el uso de ciclones o PE. De este modo, se produce un importante ahorro de energía y coste.

Entre PE o ciclones, el más favorable y el elegido ha sido el precipitador electrostático, ya que, a pesar del consumo eléctrico necesario para su funcionamiento, la caída de presión es muy baja en este equipo, a diferencia de los ciclones, donde una alta pérdida de carga hace necesario el uso de un ventilador para contrarrestarla. De este modo, el consumo energético total es bastante menor para PE.

Además, a pesar de una tecnología de un coste más elevado, la concentración de salida de partículas puede llegar a ser una diez veces mayor que para los ciclones, dando lugar así, a un ahorro en equipos posteriores debido al dimensionamiento, como se ha comentado anteriormente.

Por estos motivos, los ciclones son raramente usados en tratamiento de gases de combustión en plantas de incineración de residuos y los PE están cada vez más en uso.

Los PE secos de B&W tienen un registro probado de actuación y confiabilidad. Estos PE disponen de platos perforados que proporcionan una uniforme distribución del gas y las partículas a través del equipo. En la Figura 42 se puede observar cómo se distribuyen estos platos en el equipo.

Sus placas colectoras pueden llegar a tamaños de 6 x 16 m y cada placa puede contener paneles en 1 m de ancho. Cada panel está formado a partir de rollos de acero, lo que reduce el coste de fabricación, de montaje y problemas durante la operación. En la Figura 43 se puede observar una instalación real de precipitadores electrostáticos de B&W.

Estos PE ofrecen múltiples diseños de electrodos de descarga para generar intensos y estables campos eléctricos para cada aplicación. Los electrodos de descarga están agrupados en secciones conectadas independientemente, con cada sección soportada típicamente por cuatro aisladores de alto voltaje para su máxima estabilidad.

B&W ofrece también varios tipos de sistemas de golpeos para una mejor adaptación a las propias necesidades.

Estos sistemas suelen ser fácil de instalar y mantener.

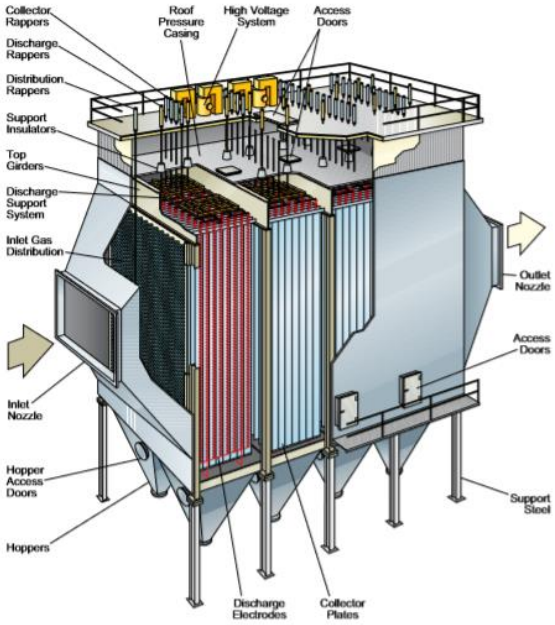

Figura 42. Diagrama de componente de un PE de B&W

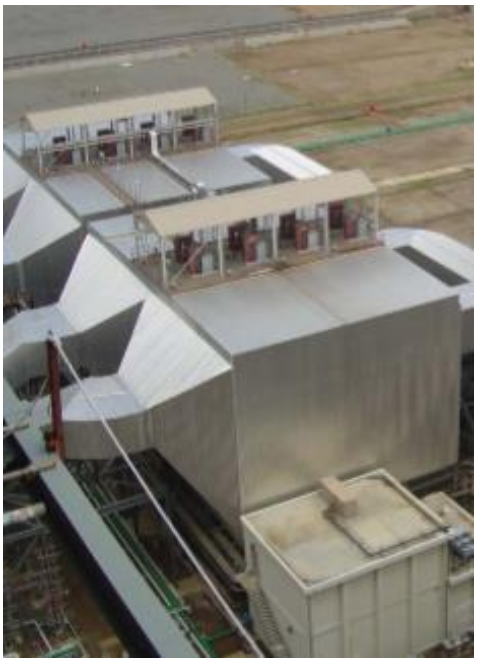

Figura 43. PE en incineradora de RSU

Algunos de los beneficios de estos sistemas son:

- Eficiencia hasta un 99,9 %.
- Temperaturas hasta 420 ºC.
- Amplio rango de capacidad.
- Bajo mantenimiento.

3.3.3 Técnicas para la reducción de gases ácidos

Son tres las principales técnicas de eliminación de gases ácidos, los sistemas húmedos, semihúmedos o semisecos y secos. Pero es una variante del sistema semihúmedo, sistema semihúmedo con recirculación de residuo, el que ha sido elegido como más conveniente. Estos sistemas además incluyen un filtro de manga.

Para la elección de este sistema, como en los casos anteriores, la minimización del consumo energético ha sido uno de los principales motivos tenidos en cuenta, además, el documento BREF destaca como MTD la recirculación de parte de los residuos para un menor consumo de reactivos. Aunque también se ha de destacar, que para esta decisión es para la que más parámetros de funcionamiento han sido comparados. Se exponen a continuación:

- Como se ha comentado, si se aplican estrictamente a las recomendaciones de las MTD, el uso de los sistemas húmedos quedaría descartado inicialmente al tener un consumo energético mayor que los sistemas secos o semisecos. Mientras que el consumo de los tratamientos húmedos puede consumir unos 19 kWh por tonelada de residuo, los semihúmedos y secos pueden consumir en torno a 10 kWh, debido principalmente a la caída de presión en el filtro de mangas.

  Por tanto, en cuanto a consumo energético los tratamientos semihúmedos y los secos están igualados,

sin embargo, si se quiere usar un sistema de recirculación de reactivos con el sistema semihúmedo, el consumo va a aumentar.

- Al añadir recirculación al absorbedor semihúmedo, se reduce tanto el consumo de reactivo, como la producción de residuos sólidos, frente a sistemas semihúmedos convencionales y sistemas secos.
- Los sistemas semihúmedos no producen efluentes líquidos a diferencia de los húmedos. Esto también se traduce en un menor coste de operación y una menor visibilidad del penacho.
- La complejidad del sistema y los costes de inversión son menores en los tratamientos semihúmedos respecto a los húmedos.
- En cuanto a eficacia de reducción y niveles de emisión, la técnica semihúmeda, con eficacias de hasta el 99 %, permitirán conseguir los niveles de emisión establecidos por las directivas.

En la tabla 7 se muestra una evaluación de diversos criterios para tener en cuenta para escoger entre los tres sistemas de tratamiento de gases ácidos. Se puede observar como los TGC semihúmedos, junto con los secos con bicarbonato sódico, son los que reciben más valoraciones positivas o neutras.

Tabla 7. Criterios comparativos entre TGC para gases ácidos

Criterios	TGC húmedo (H)	TGC semihú-medo (SH)	TGC con cal seca (CS)	TGC con bicarbona-to sódico seco (BS)	Comentarios
Emisiones a la atmósfera	+	0	–	0	• con respecto a HCl, HF, NH_3 y SO_x, los sistemas húmedos dan generalmente los niveles de emisión a la atmósfera más bajos • cada uno de los sistemas se combina normalmente con equipo adicional de control de partículas y PCDD/F • los sistemas de CS pueden alcanzar niveles de emisión similares que los de BS y SH, pero sólo con mayores dosis de reactivo y una correspondiente mayor producción de residuos.
Producción de residuos	+	0	–	0	• la producción de residuos por tonelada de residuos incinerados es generalmente mayor en los sistemas de CS y menor en los sistemas H, con mayor concentración de contaminantes en los residuos de sistemas H • la recuperación de material de los residuos es posible en los sistemas H después del tratamiento del efluente del lavador, y en los sistemas de BS
Consumo de agua	–	0	+	+	• el consumo de agua es en general mayor en los sistemas H • los sistemas secos consumen muy poca agua o nada en absoluto
Producción de efluentes	–	+	+	+	• los efluentes producidos (si no se evaporan) por sistemas H requieren tratamiento y normalmente descarga. Si puede encontrarse un receptor adecuado para el efluente salino tratado (ej. entornos marinos), la evacuación en sí puede no ser una desventaja significativa • la eliminación de amoniaco del efluente puede resultar compleja
Consumo de energía	–	0	0	0	• el consumo de energía es mayor en los sistemas H debido a la demanda de las bombas, y se incrementa más cuando (como es frecuente) se combinan con otros componentes de TGC, como eliminación de partículas
Consumo de reactivo	+	0	–	0	• generalmente, menor consumo de reactivo en los sistemas H • generalmente, mayor consumo de reactivo en CS, pero puede reducirse mediante recirculación del reactivo • los sistemas SH, y de CS y BS, pueden beneficiarse del uso de monitorización de ácidos en el gas crudo (ver 4.4.3.9)
Capacidad de adaptación a variaciones en la entrada de contami-nantes	+	0	–	0	• los sistemas H son más capaces de adaptarse a variaciones amplias y rápidas en las concentraciones de entrada de HCl, HF y SO_x • los sistemas de CS ofrecen en general menos flexibilidad, aunque esto puede mejorarse con el uso de monitorización de ácidos en el gas crudo (ver 4.4.3.9)

Tabla 7. Criterios comparativos entre TGC para gases ácidos (continuación)

Criterios	TGC húmedo (H)	TGC semihúmedo (SH)	TGC con cal seca (CS)	TGC con bicarbonato sódico seco (BS)	Comentarios
Visibilidad del penacho	–	0	+	+	• la visibilidad del penacho es generalmente mayor en los sistemas húmedos (si no se toman medidas especiales) • los sistemas secos tienen en general la menor visibilidad de penacho
Complejidad del proceso	– (mayores)	0 (medios)	+ (menores)	+ (menores)	• los sistemas H son bastante simples, pero se requieren otros componentes de proceso para proporcionar un sistema de TGC completo, como una planta de tratamiento de aguas residuales, etc.
Costes de inversión	generalmente mayores	medios	generalmente menores	generalmente menores	• los costes adicionales de los sistemas húmedos se derivan de los costes adicionales de TGC complementarios y componentes auxiliares, que son más significativos en plantas de menor tamaño
Costes operativos	medios	generalmente menores	medios	generalmente menores	• hay un coste operativo adicional de tratamiento de efluentes para sistemas H, más significativo en plantas de menor tamaño • mayores costes de eliminación de residuos al aumentar la producción de residuos, y el consumo de reactivo. Los sistemas H producen en general las menores cantidades de reactivos y por consiguiente pueden tener menores costes de desecho de reactivos • los costes operativos incluyen costes de consumibles, eliminación y mantenimiento. Los costes operativos dependen mucho de los precios locales de consumibles y desecho de residuos.

Nota:
+ significa que el uso de la técnica ofrece en general una ventaja respecto al criterio de evaluación considerado
0 significa que el uso de la técnica no ofrece en general una ventaja significativa respecto al criterio de evaluación considerado
– significa que el uso de la técnica ofrece en general una desventaja respecto al criterio de evaluación considerado

En cuanto al uso de reactivos, la cal hidratada es la usada normalmente para el caso de los absorbedores semihúmedos.

B&W Volund dispone de los tres tipos de tecnologías más importantes, pero solo en el caso de la semihúmeda, se contempla la incineración de residuo como una de sus aplicaciones. Además, los reactivos utilizados por este fabricante sólo son la cal y los residuos sólidos recirculados.

Se puede ver en la Figura 44 el sistema de eliminación de gases denominado 'Spray Dryer Absorber (SDA)', que es, un sistema de absorción por pulverización, cuya principal característica de diseño es el atomizador rotativo que inyecta la cal hidratada en la corriente caliente del gas para absorber los contaminantes ácidos. Este atomizador, que se muestra en la Figura 45, es el corazón del equipo, provocando la perfecta distribución del fino spray por la cámara minimizando cualquier deposición o humificación de las paredes.

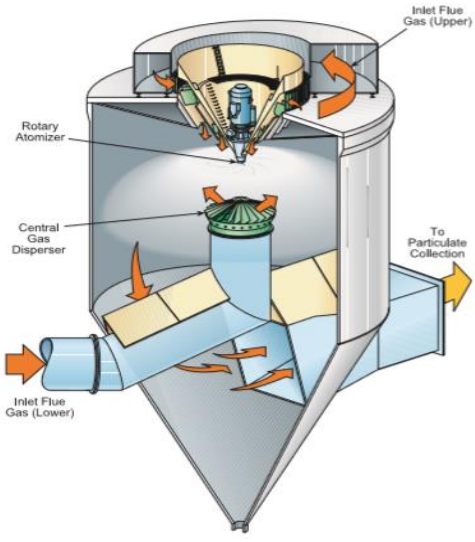

Figura 44. Diagrama de componentes del SDA

Figura 45. Atomizador

Un filtro de mangas sigue a este equipo para colectar los reactivos que no han reaccionado posibles restos de ceniza volante y los productos de reacción. Parte de esta corriente es reciclada a la entrada del atomizador. En la Figura 46 se muestra la configuración de este sistema, junto con la etapa previa de eliminación de partículas.

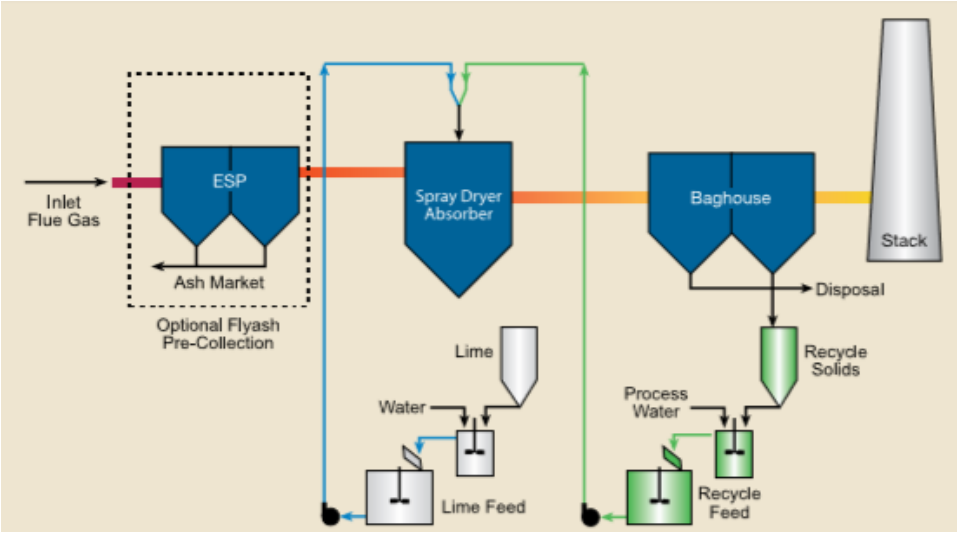

Figura 46. Diagrama de proceso del sistema SDA

Las principales características de estos sistemas se corresponden parte ellas con las citadas anteriormente en la comparación y son:

- Alta eficiencia de reducción de SO_2, hasta 95%.
- Reducción integral de las emisiones de HCl, HF, SO_3, Metales pesados y $PM_{2.5}$.
- Bajo coste de capital.
- Bajo consumo de energía en auxiliares.
- Bajos coste de operación y mantenimiento.
- Bajo consumo de agua.
- Reducción de mercurio oxidado.
- Consumo de agua de corrientes de desecho de la planta una operación de cero descargas.

Como ya se ha adelantado en este apartado, tras el absorbedor existirá un filtro de mangas. Además de su uso principalmente para la reducción de emisión a la atmósfera y recuperación de los reactivos y productos que se han creado en la etapa anterior, el filtro de manga, junto con la inyección anterior de carbón activado, puede ayudad a disminuir la cantidad de mercurio y PCDD/F.

El sistema de B&W Volund, mostrado en la Figura 47, es un filtro de mangas de pulsos ‘Pulse Jet Fabric Filter (PJFF)’ cuyas bolsas de tela se agrupan en distintos compartimentos aislados. En estos sistemas una torta de partículas se va creando sobre la superficie de las bolsas y para su limpieza, pulsos de aire controlados son inyectado por el interior de las bolsas, como se denota en la Figura 48. Estos sistemas de pulsos mejoran la eficiencia de limpieza, reducen la perdida de carga y el consumo de aire comprimido y aumentan la vida útil de las mangas. La eficiencia de eliminación puede llegar hasta el 99,9 %.

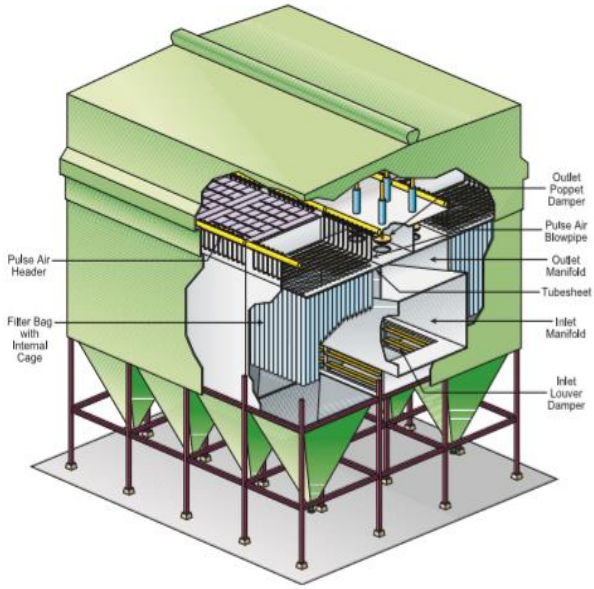

Figura 47. Diagrama de un filtro de mangas B&W

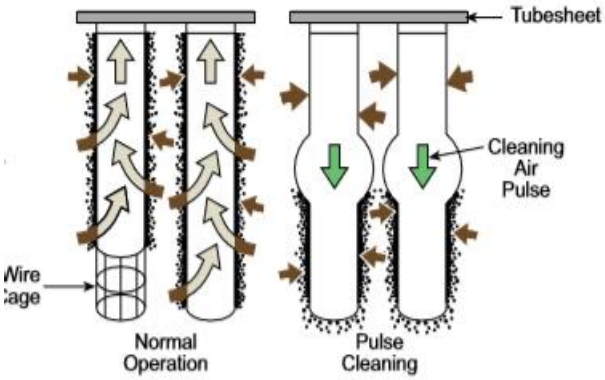

Figura 48. Método de limpieza por pulsos

Algunas de las ventajas que destaca el fabricante son las siguientes:

- La amplia longitud de sus mangas hace que se reduzcan los costes de mantenimiento, teniendo menos componentes auxiliares, lo que reduce también el tiempo y coste de construcción.
- Al disponer de varias configuraciones del techo se puede proveer un diseño que permita alcanzar con facilidad los arreglos de sitios específicos.

3.3.4 Técnicas para la reducción de emisiones de mercurio

El mercurio es un elemento muy volátil y durante la incineración va a pasar con la corriente de gases de combustión. El valor límite fijado en la directiva sobre incineración de residuos es de 0,05 mg/m3.

Para procesos semihúmedos con filtros de manga la técnica aconsejada por las MTD es la inyección de carbón activo.

La tecnología de inyección de carbón activado, 'B&W Powered Activated Carbon (PAC)' esta comercializada desde mitades de los 90. Algunas de las características de esta son:

- Uso de PAC estándars o PAC tratados con bromo según necesidades del combustible y de coste, lo que aporta flexibilidad, llegando a eficiencias de eliminación de hasta 96%.
- Modelos CFDs son usados para optimizar la inyección y uso del PAC.
- El sistema de almacenamiento a granel, manipulación y transporte, que se muestra en la Figura 49, está formado por camiones, silos (Figura 50), tolvas de pesado y alimentación y transportadores neumáticos. Un sistema sencillo que permite una fácil operación y un bajo coste de capital y mantenimiento.

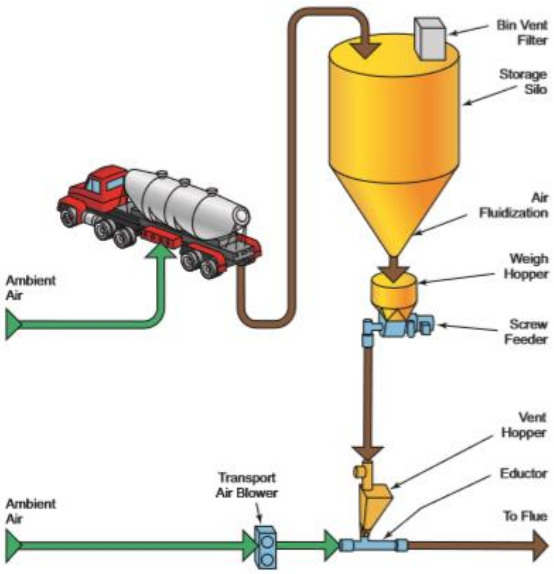

Figura 49. Diagrama de proceso de una instalación PAC

Figura 50. Silos de almacenamiento

Aunque no sea especificado en las características por B&W, también esta reportado y considerado como MTD el uso del carbón activado para la eficaz eliminación de PCDD/Fs por debajo de los límites establecidos por las directivas europeas.

Una vez hecha la elección de todos los equipos y tratamientos que van a conformar nuestra instalación, podemos realizar los balances de materia y energía con los datos reales de trabajo que nos ofrece el fabricante. Estos cálculos se detallan en el siguiente capí

4 CÁLCULOS

The fundamental problem of communication is that of reproducing at one point either exactly or approximately a message selected at another point.

Claude Shannon, 1948

En este capítulo se van a exponer los procedimientos y cálculos llevados a cabos para realizar los balances de materia y energía de la instalación. De este modo, podremos obtener una estimación del principal objetivo de este tipo de instalaciones, que será saber la cantidad de potencia eléctrica que se va a producir, también podremos estimar otro dato importante como es el consumo de reactivos necesarios para los tratamientos de gases de combustión y las emisiones a la atmósfera que se producirán.

Para obtener estos datos será necesario se partir de las características del combustible que se muestran en la tabla 4, 5 y 6 del capítulo anterior y hacer uso de cifras de rendimiento y emisiones empíricas proporcionados por B&W y en su defecto por el documento BREF.

4.1 Balances de Materia

El primer paso necesario para determinar las diferentes composiciones de las corrientes es caracterizar la combustión y para ello es fundamental determinar el aire necesario para ésta. Con esto se establecerá la composición de la corriente de gases combustión, que será la partida para los cálculos de la etapa de tratamiento.

4.1.1 Cálculo de la cantidad de aire necesario para la combustión.

En este apartado se va a calcular el aire necesario para la combustión de RSU. Este aire será el que aporte el oxígeno para que se den las siguientes reacciones:

(1) $C + O_2 \rightarrow CO_2$

(2) $2\ H_2 + O_2 \rightarrow 2\ H_2O$

(3) $S + O_2 \rightarrow SO_2$

Además, se ha de sumar el oxígeno necesario para la combustión del combustible auxiliar (gas natural).Se ha supuesto un valor de 10 m^3 de GN necesarios por tonelada de residuos a incinerar. Este valor se ha obtenido a partir del documento BREF. La reacción que tiene lugar es la siguiente:

(4) $CH_4 + 2O_2 \rightarrow 2\ H_2O + CO_2$

Sumando la cantidad de oxígeno necesario para cada reacción se obtiene el oxígeno total necesario, y a partir de este se puede obtener el aire necesario. Este es aire teórico o estequiométrico al que habrá que sumarle el exceso para obtener el aire total real. Como se ha comentado en el capítulo anterior, los hornos Dynagrate permiten trabajar con excesos de aire (EA) muy bajos, siendo el ratio típico usado por estos entre 1.2-1.5, se ha elegido un valor intermedio de 1.35. [32]

Se muestras a continuación los cálculos realizados:

$$Aire\ teórico\ necesario\ \left(\frac{kg}{h}\right) = \frac{\left(Oxígeno\ teórico\ necesario\ \left(\frac{kmol}{h}\right) \cdot PM_{aire}\right)}{0{,}21}$$

$$Aire\ real\ necesario\ \left(\frac{kg}{h}\right) = Aire\ teórico\ necesario \cdot (EA)$$

Donde,

$$PM_{aire} = 28{,}98 \frac{kg}{kmol}$$

$$EA = 1{,}35$$

En la tabla 8, se muestran los valores de entrada de cada reactivo y la cantidad de aire estequiométrico o teórico para que se produzca cada reacción.

Tabla 8. Cálculo del aire estequiométrico necesario.

Reacciones	**Reactivo**	**Masa molecular (kg/kmol)**	**Kmol/h**	**Kmol/h O_2 necesario**	**Kg/h O2 necesario**
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow 2\ H_2O + CO_2$	**CH_4**	16	30,31	60,63	1940,16
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	**C**	1134,91	1134,91	1134,91	36316,97
$2\ H_2 + O_2 \rightarrow 2\ H_2O$	**H_2**	445,27	891,07	445,27	14248,51
$S + O_2 \rightarrow SO_2$	**S**	32,00	1,53	1,53	48,93

El aire estequiométrico necesario para la combustión completa de los residuos es de 1.815.292,06 t/año. Y el aire real necesario es de 2.450.644,27 t/año.

4.1.2 Cálculo de los gases de combustión.

A los productos formados en las reacciones de combustión del apartado anterior, hay que añadirle el monóxido de carbono formado en la siguiente reacción:

(5) $C + 0{,}5\ O_2 \rightarrow CO$

Para determinar la cantidad de carbono que reacciona según la reacción (5), se ha partido de la cantidad de CO que se produce en los hornos Dynagrate. Se han encontado diversos valores de emisión según la planta, con algunos más bajos como los de la planta Reno-Nord en Aalborg, en torno a de 5 mg/Nm^3 , como se puede observar en la figura y otros mayores como el caso de la planta de Amager Bakke o la planta Energnist (L90) que aseguran el valor límite de la Directiva 200/76 de 50 mg/Nm^3. Este valor ha sido el empleado para los cálculos por ser el más desfavorable. [50]

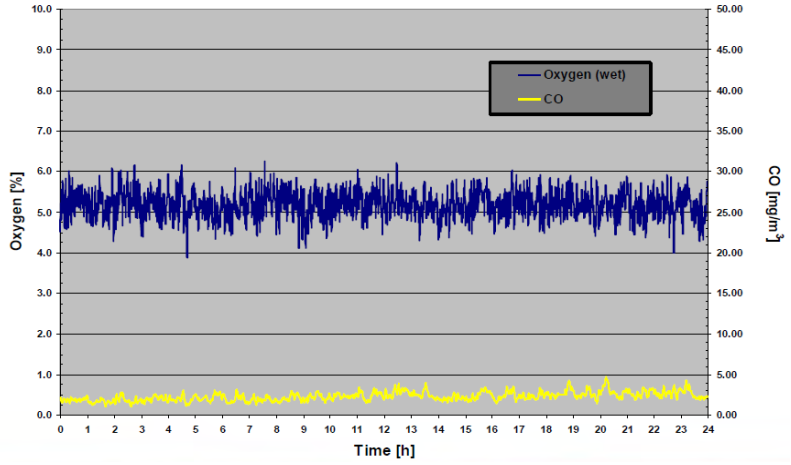

Figura 51. Parámetros de combustión en horno de planta Reno-Nord [51]

Para realizar el cálculo de C reaccionado a CO, al partir de una concentración, para determinar la cantidad por unidad de tiempo se debe conocer el volumen total de gases a la salida. Se ha de realizar por tanto una iteración, sumando cada vez la cantidad de CO a la total. Para este caso, como el valor de salida del monóxido de carbono, es insignificante con respecto a los otros, como se puede observar en la Tabla 9, con solo una iteración ha sido suficiente.

Por otro lado, se ha de tener en cuenta, que no todo el carbono reacciona, sino que parte de este sale con las cenizas como inquemados. La cantidad de inquemados se ha obtenido como una media de las composiciones de varios estudios sobre cenizas de plantas incineradores. Esto supone un 3,9 % de las escorias y un 9 % del total de cenizas volantes [52]. Las cantidades exactas se pueden observar en la Tabla 13.

Por otro parte el cloro presente también reacciona, por lo que hay que añadirle el HCl formado en la siguiente reacción:

(6) $Cl_2 + H_2 \rightarrow 2\ HCl$

Al no disponerse de datos sobre el flúor en la composición, no se ha podido determinar la cantidad de HF que se podría producir.

Además, el aire introducido contiene humedad que también se ha de sumar a los gases de salida.

Para determinar la cantidad de agua introducida con el aire, se ha de calcular la humedad específica de este. Se han tomado datos estadísticos sobre la humedad relativa media y la temperatura media por meses de los últimos dos años en Sevilla, y a partir de estos se ha sacado una media de ambos parámetros. Se ha obtenido así un Humedad relativa del 55% y una temperatura de 20,2 ºC. [53]

Con estos datos, haciendo uso del diagrama psicométrico de ha obtenido una Humedad específica de 0,08 kg de H_2O por kg de aire seco introducido.

El cálculo por tanto es el siguiente:

$$H_2O\ aire\ \left(\frac{t}{año}\right) = Aire\ real\ necesario\left(\frac{t}{año}\right) * H_{específica}$$

Donde,

$$H_{específica} = 0{,}08\frac{t\ H_2O}{t\ aire\ seco}$$

El agua introducida con el aire es de 19.119,21 t/año. Para obtener el agua total que sale con los gases de

combustión, tenemos que sumarle la formada por las reacciones de combustión y la introducida por el combustible, y restarle la que sale con las escorias. Para determinar esta última, se ha utilizado un contenido medio de humedad en las escorias según varias plantas de incineración de RSU. Este contenido es de 15,5%. [54]

Por tanto, la cantidad de agua que sale con los gases de combustión, en forma de vapor, es de 332.667,26 t/año.

También se ha de añadir a los gases de salida los NOx ($NO+NO_2$) formados que provienen principalmente de la oxidación del N presente en el combustible (NOx del combustible) y de la oxidación del nitrógeno en el aire (NOx térmico). La formación de estos sigue mecanismos complejos, por lo que para estimar su la cantidad formada se ha procedido del mismo modo que con el cálculo de CO.

El documento sobre las Mejores Técnicas Disponibles establece unos valores de salida de caldera entre 250-500 mg/Nm^3, mientras que el fabricante del horno, haciendo uso de ciertas técnicas primarias, establece que la concentración a la salida puede llegar a ser de 200 mg/Nm^3. En este estudio, se ha utilizado el valor de emisión de las plantas instaladas por B&W Volund mas alto, que es de 400 mg/Nm^3 en la planta de Sundsvall en Suecia. [55]

De igual modo que con el CO, realizando una sola iteración llegamos a un resultado, ya que el valor de estos compuestos con respecto al total es apenas un 0,02%. La cantidad de NOx formados es de 703,07 t/año. De estos, como se especificó en apartado anterior, el 95% se presenta como NO, lo que significa una cantidad de 667,91 t/año y el 5% restante como NO_2, que son 35,15 t/año.

Con la corriente de gases de escape también sale el nitrógeno introducido con el aire y el oxígeno que no ha reaccionado. Estos se obtienen de la siguiente forma:

$$N_2\ gases\ de\ combustión\ \left(\frac{kg}{h}\right) = Aire\ real\ necesario\ \left(\frac{kmol}{h}\right) \cdot PM_{aire} \cdot 0{,}79$$

$$O_2\ gases\ de\ combustión\ \left(\frac{kg}{h}\right) = \ Oxígeno\ teórico\ necesario\ \left(\frac{kmol}{h}\right) \cdot PM_{Oxígeno} \cdot EA$$

El nitrógeno es el componente mayoritario de la corriente de gases de escape, con un total de 1.822.931,31 t/año. La salida de oxígeno es de 18198,78 t7año.

Con esto tenemos totalmente definida la corriente de salida de gases de combustión del horno. La tabla 9 muestra la composición de esta. Como se puede observar, el porcentaje de oxígeno en la corriente es del 5,8%, este valor, queda muy cerca del 5 % con el que trabajan los hornos de B&W para el exceso de aire establecido y que se puede observar en la Figura 51.

Para el resto de las componentes, se pueden observar cómo quedan dentro o muy cerca de estarlo, del rango que nos da el documento BREF de diversas plantas. Es cierto que el CO_2, se queda por encima de este rango, sin embargo, hay que tener en cuenta que se toma un valor de referencia del 11% de O_2. Si en nuestra incineradora, trabajásemos con un mayor exceso de oxígeno, y este a la salida quedara más cercano al 11%, la cantidad de CO_2 estaría más diluida y quedaría dentro.

Con respecto al HCl, en este caso, este producto depende directamente de la cantidad Cl en el RSU, y si esta es baja, la cantidad de HCl también lo será.

Además de estos rangos, también se da uno con respecto al volumen total de gases. Este se encuentra entre 4500 y 6000 Nm^3 por tonelada de residuo alimentado. En nuestro caso tenemos 3768,37 Nm^3 por tonelada de residuo alimentado, por lo que estamos algo por debajo. Esto es lógico, ya que como se ha comentado anteriormente la cantidad de exceso de aire con la que se trabaja es baja con respecto a la que se trabaja normalmente.

Tabla 9. Composición de gases de combustión a la salida del horno.

Productos	kg/h	Nm^3/h	Concentración	Rango 11%O_2 (según MTD)
CO	22,79	18,23	50 mg/ Nm^3	5-50 mg/ Nm^3
CO_2	49514,17	25262,33	11,64 %	5-10 %
SO_2	97,86	33,44	445 mg/ Nm^3	200-1000 mg/ Nm^3
HCl	39,52	24,28	179,88 mg/ Nm^3	500-2000 mg/ Nm^3
O_2	18198,78	12735,32	5,8 %	-
N_2	227866,41	182293,13	-	-
H_2O	41583,40	-	12,27 %	10-20 %
NOx	87,88	65,85	400 mg/ Nm^3	250-500 mg/ Nm^3
TOTAL	338900,33	220779,37		

4.1.3 Cálculo de reactivos para el tratamiento de los gases de combustión y emisiones

Los reactivos necesarios, de los cuales se han de determinar las cantidades son, la urea necesaria para el abatimiento de los NOx, la cal hidratada para la eliminación de los compuestos ácidos, y el carbón activado para la adsorción de mercurio y dioxinas.

En primer lugar, se va a calcular el caudal de urea que se ha de inyectar. La reacción que tiene lugar entre esta y los NOx son las siguientes:

$4NO + 2CO(NH_2)_2 + O_2 \rightarrow 4N_2 + 4H_2O + 2CO_2$

$2NO_2 + 2CO(NH_2)_2 + O_2 \rightarrow 3N_2 + 4H_2O + 2CO_2$

Considerando un rendimiento de eliminación de un 70%, que es el valor intermedio del rango especificado por B&W, y un exceso de reactivo también intermedio de 1,5, ya que ambos parámetros suelen estar relacionados. [56] [32]

En la tabla 10, se muestran los reactivos y productos que están implicados en esta etapa de tratamiento. Se entiende que a la salida del horno es donde tiene lugar la inyección de la solución de urea, y la salida del RNCS es la correspondiente a la salida de la caldera, donde los gases pasarán al precipitador electrostático.

Tabla 10. Composición corrientes sistema RNCS

	Salida de horno (kg/h)	Salida de horno (kmol/h)	Reaccionan (kmol/h)	Salida RNCS (kmol/h)	Salida RNCS (kg/h)
NO	83,49	2,78	1,95	0,83	25,05
NO_2	4,39	0,10	0,07	0,03	1,32
$CO(NH_2)_2$	133,83	2,23	1,04	1,19	71,38
O_2	18198,78	568,71	0,62	568,09	18179,01
N_2	227866,41	8138,09	2,05	8140,13	227923,77
H_2O	41717,24	2317,62	2,08	2319,71	41754,71
CO_2	49514,17	1125,32	1,04	1126,36	49559,97

El caudal de urea necesario es de 1070,65 t/año, Esta urea se inyecta en solución acuosa al 50% en peso, por lo que serán necesarios también 1070,65 t/año de agua.

La cantidad de urea introducida por tonelada de r residuo es de 2,28 kg. Podemos comparar este valor con el utilizado con la planta Hampshire Waste Services Ltd, en el Reino Unido, cuyo diseño es bastante similar al propuesto en este proyecto, y que utiliza 1,25 kg por tonelada de residuo. Este valor es algo menor que el utilizado en nuestro caso, sin embargo, y a pesar de no conocerse la cantidad de NOx que se produce en el horno, se puede intuir que el rendimiento ees bastante menor, ya que presentan unos valores de emisión en gas limpio de 177 mg/Nm^3, muy cercano a los valores límintes de emisión para este contaminante.

En segundo lugar, para el caso de la eliminación de los gases ácidos, las reacciones que tienen lugar con la cal apagada son las siguientes:

$SO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaSO_3 + H_2O$

$2HCl + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCl_2 + 2H_2O$

Como se ha comentado anteriormente, no se ha considerado la eliminación de HF, ya que no se disponen de datos de entrada de fluor con el combustible.

Según la tecnología SDA para la eliminación de gases ácidos de B&W Volund, descrita en el capítulo 3, se pueden obtener eficacias de eliminación entre 92 y 98 % para SO2 y a partir de 95% para HCl, por tanto, se ha tomado un valor del 95% para ambos contaminantes. Se selecciona también un exceso estequiométrico de 2, el intermedio s Según los valores que ofrece el documento BREF. [57] [17]

Al igual que para el caso del sistema RNCS, se muestran en la Tabla 11 las corrientes implicadas en este sistema de tratamiento. En este caso, a la entrada del equipo se tienen los mismos valores de gases ácidos que a la salida del horno y de agua que a la salida del sistema de eliminación de NOx. Se ha supuesto que en el sistema intermedio de eliminación de partículas, no se elimina agua.

Como se puede observar en las corrientes de salida del SDA , los gases ácidos ya se muestran reducidos al 95%, sin embargo, esto no es del todo cierto, ya que parte de estos contaminantes se eliminan también en el filtro de manga.

Tabla 11. Composición corrientes sistema SDA

	Entrada SDA (kg/h)	**Entrada SDA (kmol/h)**	**Reaccionan (kmol/h)**	**Salida SDA (kmol/h)**	**Salida SDA (kg/h)**
HCl	39,52	1,08	1,03	0,05	1,98
SO_2	97,86	1,53	1,45	0,08	4,89
$Ca(OH)_2$	291,21	3,94	1,97	1,97	145,61
$CaSO_3$	-	-	1,45	1,45	174,31
$CaCl_2$	-	-	0,52	0,52	56,66
H_2O	42482,74	2360,15	2,48	2362,63	42527,43

La cantidad de cal apagada necesaria es de 579,17 t/año. Esta se encuentra normalmente diluida 5 veces en agua, por lo que será necesario un caudal de agua de 5824,22 t/año. [58] La cantidad de lechada de cal utilizada es de 2,48 kg por tonelada de residuos alimentados a la planta, esta cantidad se encuentra por debajo del rango típico que señala el documento para las MTD entre 6 y 22 kg/ t de RSU.

Se ha de tener en cuenta, que no se ha determinado la cantidad necesaria para la eliminación de HF. Por estequiometría, la cantidad necesaria para eliminar 1 kg de HF es mayor que los otros gases ácidos. Aun así, posiblemente ese valor estaría bajo la cantidad inferior de dicho rango.

Una de las razones por la que salga ese valor tan bajo puede ser, el bajo contenido en cloro y por tanto la baja formación de HCl, como se discutió anteriormente. También se puede deber a las altas eficiencias de reducción del sistema o a que ese rango incluya también el agua necesaria para la dilución de la cal hidratada.

Por último, se ha de calcular la cantidad de carbón activado necesario. No se dispone de datos de entrada de Hg con el residuo, ni se ha estimado la formación de PCDD/F.

Sin embargo, no ha sido necesario ya que para ello se han tomado valores típicos del documento para las MTD. Según este se reportan índices de consumos típicos entre 0,35 y 3 kg por tonelada de residuo incinerado con los que se consigues valores de emisión por debajo de los valores límites.

Siguiendo la misma línea que en los casos anteriores, usaremos un valor intermedio, en este caso de 1,70. La cantidad de carbón activo necesario es de 796,79 t/año.

En la tabla 12 se recogen las concentraciones de los contaminantes emitidos a la atmósfera que se han tratado en este proyecto.

Las concentraciones de HCl, SO2 y NOx para los que se establecen VLE, se ha de tener en cuenta que se tienen concentraciones referidas al porcentaje de salida de oxígeno de nuestra planta (5,77%), mientras que los VLE están referidas al 11%. La directiva 2000/76/CE facilita una fórmula para referir los valores al 11%. Es la siguiente:

$$E_S = \frac{21 - O_S}{21 - O_M} \cdot E_M$$

Donde,

$$E_S = concentración\ de\ emisiones\ calculada\ en\ la\ concentración\ porcentual\ normal\ de\ oxígeno$$

$$E_M = medición\ de\ la\ concentración\ de\ emisiones$$

$$O_S = concentración\ normal\ de\ oxígeno$$

$$O_S = medición\ de\ la\ concentración\ de\ oxígeno$$

En la Tabla 12 se pueden observar estos valores corregidos. Como era de esperar, las emisiones se encuentran por debajo de los VLE, teniendo además un margen importante, que es necesario, ya que estos valores de emisión de nuestra planta pueden variar por posibles cambios en la naturaleza de los residuos a tratar o también pueden variar las leyes y que los VLE se hagan más restrictivos.

Tabla 12. Composición de la corriente de gases emitidos a la atmósfera

Contaminante	**kg/h**	**mg/Nm^3**	**mg/Nm^3 (11%)**	**VLE (mg/Nm^3)**
NOx	39,72	180,28	118,37	200
HCl	1,98	8,97	5,89	10
SO_2	4,89	22,21	14,58	50
CO	22,79	18,232	32,82	50
Compuesto	**kg/h**	**%v/v**		
O_2	18179,01	5,77		
N_2	227923,77	82,75		
Compuesto	**kg/h**	**%p/p**		
H_2O	42527,43	12,55		

4.1.4 Cálculo de residuos sólidos

Dos son las corrientes principales de residuos sólidos que se obtienen. Por un lado, se tienen las escorias procedentes del horno, y por otro lado las cenizas volantes (CV) y los residuos procedentes de los tratamientos de gases.

Para el cálculo de la cantidad de ceniza y escorias formadas se ha partido del análisis de composición del RSU de la Tabla 5. Según esta, el porcentaje de cenizas supone una cantidad de 89.465,46 t/año.

Según las MTD, la cantidad típica de cenizas volantes se mueve entre 20-40 kg por tonelada de residuos, y la de escorias entre 220-340 kg por tonelada de residuos. De estos valores se puede deducir que la cantidad de cenizas volantes respecto a la total (cenizas volantes + escorias) se mueve entre 9-10%. Se ha estimado por tanto un valor intermedio de 9,5% de cenizas volantes del total de cenizas obtenidas a 750ºC para realizar este cálculo.

Por tanto, la cantidad de escorias eliminadas en el horno será de 81413,56 t/año, y la cantidad de cenizas volantes que pasaran al tratamiento de gases de combustión es de 8051,89 t/año.

Las composiciones se han obtenido como una media de las composiciones de varios estudios sobre cenizas de plantas incineradores y se presentan en la Tabla 13. Al ser una media de porcentajes de varios estudios, estos porcentajes no representan exactamente el 100 % de la composición. Otros componentes como el cloro o algunos metales pueden completar estas cantidades.

A pesar de ser una estimación, los resultados se pueden comprobar que son coherentes con la composición de minoritarios del RSU. Se puede observar como El SiO_2, el CaO son los compuestos más importantes en las escorias y las CVs, como por su parte lo son el Si y el Ca en los minoritarios del residuo. Lo mismo ocurre con los que siguen que son el Al y el Fe.

Además, incluso algunas cantidades están parejas, para el caso del SiO_2 y el CaO, la cantidad que sale con las cenizas es de 15.973,01 t/año y 27.926,32 t/año, respectivamente, y la cantidad de Si y Ca que entra es de 15.969,39 t/año y 28.072,59 t/año.

Tabla 13. Caracterización de las escorias y las cenizas volantes

	Escoria (t/año)	**CV(t/año)**	**% Escoria**	**%CV**
SiO_2	13854,55	2118,45	17,02%	26,31%
Al_2O_3	5814,96	618,85	7,14%	7,69%
CaO	25615,76	2310,66	31,46%	28,70%
Fe_2O_3	1999,72	484,38	2,46%	6,02%
MgO	2131,00	185,77	2,62%	2,31%
K_20	4287,44	212,78	5,27%	2,64%
Na_2O	465,10	620,80	0,57%	7,71%
SO_3	6343,74	321,67	7,79%	4,00%
P_2O_5	1614,70	251,62	1,98%	3,13%
TiO_2	1466,80	121,78	1,80%	1,51%
LOI	3187,34	724,67	3,92%	9,00%

Por otro lado, se tiene el residuo de los tratamientos de gases eliminado en el filtro de mangas, que se eliminarán junto a las cenizas volantes del precipitador electrostático. Estos residuos estarán formado por la salida de urea del RNCS que se muestra en la tabla 10, la salida de $Ca(OH)_2$, $CaSO_3$ y $CaCl_2$ de la tabla 11 , y el carbón activo inyectado.

Estos residuos suman un total de 12432,28 t/año. Considerando una eficacia global de eliminación del 99,9%, según se vio en el apartado anterior para los equipos de eliminación de partículas, se tiene que se emiten a la atmosfera con los gases de combustión 12,43 t/año de partículas. Lo que supone una concentración en los gases de salida de 4,63 mg/Nm^3,por lo que está por debajo del VLE de la directiva 2000/76/CE de 10 mg/Nm^3.

4.2 Balances de Energía

En este apartado se van a detallar los cálculos llevados a cabo para estimar la energía eléctrica que va a producir nuestra planta.

En primer lugar, se va a calcular la cantidad de energía aportada por el combustible:

$$E_{comb}\left(\frac{MJ}{\text{año}}\right) = PCI\ \left(\frac{MJ}{kg}\right) \cdot M_{Comb}\left(\frac{kg\ RSU}{h}\right) \cdot Disponibilidad$$

Donde,

$$PCI = 15{,}65\frac{MJ}{kg}$$

$$M_{Comb} = 58{,}587{,}51\frac{kg\ RSU}{h} = 468{,}700{,}00\frac{t\ RSU}{\text{año}}$$

$$Disponibilidad = 8000\frac{h}{\text{año}}$$

La disponibilidad de la planta ha sido elegida según los datos del fabricante, que reporta plantas con 8000 horas de operación al año, e incluso más.

La cantidad de energía suministrada por el combustible es de 7,335,155 GJ/año.

En segundo lugar, se ha de calcular la energía aportada por el aire introducido necesario para la combustión, este aire se va a introducir a 150 ºC. El cálculo es el siguiente:

$$E_{aire}\left(\frac{GJ}{\text{año}}\right) = h_{aire\ humedo\ 150ºC}\left(\frac{GJ}{kg}\right) \cdot Aire\ real\ necesario\ (\frac{kg}{\text{año}})$$

Donde,

$$h_{aire\ humedo\ 150ºC} = 337{,}39\frac{KJ}{kg} = 3{,}37 \cdot 10^{-4}\frac{GJ}{kg}$$

La energía total suministrada por el aire es de 723,533, 75 GJ/año.

Para el cálculo de la energía suministrada por el combustible auxiliar (gas natural), se ha supuesto un valor de 10 m^3 de GN necesarios por tonelada de residuos a incinerar. Este valor se ha obtenido a partir del documento BREF. La energía total aportada por el combustible se obtiene del siguiente modo:

$$E_{GN} = 10\frac{m^3}{t\ RSU} \cdot M_{comb}\left(\frac{t\ RSU}{\text{año}}\right) \cdot PCI_{GN}(\frac{GJ}{m^3})$$

Donde,

$$PCI_{GN} = 0{,}038\ \frac{GJ}{m^3}\ [59]$$

La energía total aportada por el combustible auxiliar es de 175,481,21 GJ/año,

La suma de estas tres anteriores constituyen la energía producida en el horno durante el proceso de combustión, esta cantidad es de 8,234,170,03 GJ/año,

Realmente toda esta energía no se va a convertir en energía útil, ya que se producen pérdidas e ineficiencias por distintos motivos.

Algunos de estos motivos son las ineficiencias durante el proceso de combustión, para calcularla determinamos la energía que sale con los gases de combustión y con las escorias: Se calculan a continuación:

$$E_{Gases}\left(\frac{GJ}{\text{año}}\right) = \frac{\sum E_x(\frac{KJ}{\text{año}})}{10^6}$$

$$E_x\left(\frac{KJ}{\text{año}}\right) = Cp_x\left(\frac{KJ}{kg \cdot K}\right) \cdot (T_{Gases} - T_{ambiente})(K) \cdot M_{x,gases}\left(\frac{kg}{\text{año}}\right)$$

Donde,

$$T_{Gases} = 180\ °C = 453\ K$$

$$T_{ambiente} = 25\ °C = 293\ K$$

$$x \equiv CO, CO_2, H_2O, N_2, SO_2, O_2, HCl$$

La temperatura de salida de los gases se ha elegido siguiendo las siguientes recomendaciones:

- A niveles por debajo de 180 ºC existe mayor riesgo de corrosión, al encontrarse esta temperatura cerca del punto de rocío de algunos gases ácidos
- Está considerado como MTD, trabajar a temperaturas inferiores a 200 ºC para evitar el riego de formación de PCDD/Fs
- El rango de temperatura de salida aconsejado por el fabricante esta entre 150 y 200 ºC

La energía total que se pierde con los gases de combustión es de 415156,45 GJ/año. En la tabla 14, se puede observar la cantidad aportada por cada compuesto.

Tabla 14. Caracterización energética de los gases de combustión

	Cp (kJ/kg·K)	**H-Ho (kJ/kg)**	**GJ/año**
CO	1,05	162,75	29,67
CO_2	0,85	131,13	49455,58
H_2O	1,87	290,35	78422,50
N_2	1,04	161,05	263427,41
SO_2	0,60	93,16	36,49
HCl	0,99	154,07	23,79
O_2	0,92	142,29	23711,01

Otra de las pérdidas es el de las escorias y cenizas volantes. Para las primeras, como se dispone del porcentaje del RSU a una temperatura de 750ºC, y esa cantidad correspondiente es la que se ha usado para estimar las pérdidas, se ha supuesto que salen a esa temperatura. Para el caso de las cenizas volantes se ha supuesto la misma temperatura que la de salida de los gases.

Para simplificar los cálculos solo se han tenido en cuenta los componentes mayoritarios:

$$E_{Escorias}\left(\frac{GJ}{\text{año}}\right) = \frac{\sum E_{i,escorias}(\frac{KJ}{\text{año}})}{10^6}$$

$$E_{Cenizas\ volantes}\left(\frac{GJ}{\text{año}}\right) = \frac{\sum E_{i,cenizas\ volantes}(\frac{KJ}{\text{año}})}{10^6}$$

$$E_{i,escorias}\left(\frac{KJ}{\text{año}}\right) = (H_{i,T\ escorias} - H_{i,T\ ambiente})\left(\frac{KJ}{kg}\right) \cdot M_{i,escorias}\left(\frac{kg}{\text{año}}\right)$$

$$E_{i,cenizas\ volantes}\left(\frac{KJ}{\text{año}}\right) = (H_{i,T\ cenizas} - H_{i,T\ ambiente})\left(\frac{KJ}{kg}\right) \cdot M_{i,Cenizas}\left(\frac{kg}{\text{año}}\right)$$

Donde,

$$T_{Escorias} = 750\ °C = 1023\ K$$

$$T_{ambiente} = 25\ °C = 293\ K$$

$$i \equiv SiO_2, Al_2O_3, CaO, Fe_2O_3, MgO, K_2O, Na_2O, SO_3, TiO_2, Cl, LOI\ , Metales$$

Además, se ha de tener en cuenta que [52]:

- Las composiciones se han obtenido como una media de las composiciones de varios estudios sobre cenizas de plantas incineradores
- El término LOI hace referencia a 'Lost of Ignition', que es la cantidad de carbono inquemado presente en las cenizas
- Para las características energéticas de los metales se ha tomado la del Zinc que es el componente mayoritario

Se muestra en la tabla 15 la energía perdida por componente en las escorias y cenizas. Las entalpías de cada componente se han obtenido del Libro Web de Química del NIST [60]:

Tabla 15. Caracterización energética de las escorias y CV

	$E_{escorias} + E_{cenizas}$ (GJ/año)
SiO_2	11792,66
Al_2O3	4909,43
CaO	17577,88
Fe_2O_3	1576,42
MgO	1901,65
K_2O	3379,36
Na_2O	977,96
SO_3	3957,93
TiO_2	979,88
LOI	46812,64
Cl	3708,34
Metales	561,74

Con esto podemos obtener la eficiencia de combustión de la siguiente forma:

$$\eta_{comb} = \frac{(E_{comb} + E_{aire} + E_{GN}) - E_{Gases} - E_{Escorias}}{(E_{comb} + E_{aire} + E_{GN})}$$

Se obtiene un rendimiento de combustión del 93,2 %.

Para el cálculo de la eficiencia de la caldera hay que tener en cuenta la eficiencia térmica que mide la efectividad en el intercambio de calor en la caldera y las perdidas debido a radiación, cenizas y agua de caldera, que se suponen de un 3%, según en apéndice 10.4 del documento BREF:

$$\eta_{caldera} = \eta_{comb} \cdot \eta_{Térmica} \cdot \eta_{rad,cen,ag}$$

Donde,

$$\eta_{Térmica} = 0{,}93$$

$$\eta_{rad,cen,ag} = 0{,}97\ (ineficiencias\ debido\ a\ la\ radiación\ ,\ cenizas\ y\ agua\ de\ caldera)$$

Para la elección de la eficiencia térmica se ha elegido un valor intermedio de las eficiencias que muestran las plantas de B&W Volund, estás se mueven entre el 87 % en el caso de la planta Reno-Nord y el 98% en el caso

de la planta Fiborna.

Así, obtenemos un valor de eficiencia de caldera del 84,1 %. Este valor se encuentra cercano al máximo del rango que ofrece un estudio de 50 plantas por parte del subgrupo de energía del GGT y que se publica en documento BREF [23].

Suponiendo que un 10 % de energía se consume internamente, como se especifica en las MTD, obtenemos el total de la energía que va a ser útil para producir vapor:

$$\eta_{vapor} = \eta_{caldera} \cdot \eta_{interno}$$

$$E_{vapor}(\frac{GJ}{\text{año}}) = (E_{comb} + E_{aire} + E_{GN})(\frac{GJ}{\text{año}}) \cdot \ \eta_{vapor}$$

Donde,

$$\eta_{interno} = 0{,}90$$

Tenemos un rendimiento a producción de vapor del 76% y una energía de 6,268,543 GJ/año. Con esta energía podemos calcular la cantidad de vapor que se puede producir:

$$M_{vapor}\left(\frac{t}{\text{año}}\right) = \frac{E_{vapor}(\frac{GJ}{\text{año}})}{h_{450\,℃,50\,bar}(\frac{GJ}{t}) - \ h_{150\,℃,50\,bar}(\frac{GJ}{t})}$$

Donde,

$$h_{450\,℃,50\,bar} = 3315{,}60\ \left(\frac{KJ}{kg}\right) = 3{,}35\ \left(\frac{GJ}{t}\right)$$

$$h_{150\,℃,50\,bar} = 554{,}45\ \left(\frac{KJ}{kg}\right) = 0{,}55\ \left(\frac{GJ}{t}\right)$$

Al igual que se ha hecho anteriormente, los parámetros de vapor han sido elegido tomando un valor medio de los parámetros a los que operan varias plantas de B&W Volund. Estas operan entre 40 – 70 bares, y 400-450 ºC, pero existen nuevas plantas que están operando a temperaturas más elevadas (hasta 480ºC) debido a la implementación de una nueva tecnología denominada 'Steamboost', por lo que en este caso se ha elegido el valor superior.

También se ha aplicado el mismo criterio para determinar la eficiencia eléctrica de nuestra planta, en este caso esta se mueve entre un 22 – 28, para las plantas que solo producen electricidad, como es nuestro caso. Por tanto, el cálculo de la potencia suministrada es el siguiente:

$$E_{eléctrica}\left(\frac{GJ}{\text{año}}\right) = E_{vapor}\left(\frac{GJ}{\text{año}}\right) \cdot \eta_{eléctrica}$$

Donde,

$$\eta_{eléctrica} = 0{,}25$$

El caudal de vapor producido por nuestra planta es de 2,226,034,45 t/año y la energía eléctrica suministrada sería de 54,31 MW.

Un estudio de ocho plantas de IRS investigadas (datos de 2001), realizado por el subgrupo de energía del GTT, dio valores de exportación de energía entre 1,004 y 1,649 GJ por tonelada de residuos para una eficiencia a electricidad del 18% , en nuestro planta tenemos 3,36 GJ/tRSU pero con una eficiencia del 25%. Este alto valor también se puede deber al alto poder calorífico de nuestro combustible.

Para hacer una comparación con otras plantas de incineración operativas, nos vamos a fijar en las que tengan los parámetros de vapor y la cantidad de residuos tratados más parecidos. Por ejemplo, la planta de Helsinborg en Suecia trabaja con vapor a 425ºC y 50 bares, y la capacidad de la planta es de 27 t/h , un poco menor que la de una línea nuestra. Ésta planta produce 88 t/h de vapor, mientras que una de las líneas de la nuestra produce 142,53 t/h. Nuestra planta presenta un valor mucho más alto de producción de vapor.

Sin embargo, no quiere decir que lo que se produce sea desmesurado, ya que por ejemplo en la planta de Amager Bakke, aunque con una presión de vapor de 70 bares, y 35 t/h, se producen 140,10 t/h de vapor, o en el caso Palm Beach en EE.UU, con una presión de vapor de 63 bares y una entrada de residuos de 37,5 t/h, se producen 128,7 t/h de vapor.

4.3 Estimación de costes

Aquí se presenta una estimación de costes según el Anexo 10.2 del documento BREF. Se consideran los aspectos económicos de los siguientes elementos:

- Costes de descarga y almacenamiento
- Estimaciones de coste con tecnología de parrilla y coste de la caldera
- Costes del del ciclo de vapor de agua par recuperación de energía
- Opciones seleccionadas para tratamiento de gases de combustión

Los costes de una planta de incineración de residuos dependen de los muchos factores, como, por ejemplo: diseño de la planta, tamaño, infraestructura local, condiciones de límites específicas para el desecho de residuos, posibilidad de aprovechamiento de la energía, etc. Por ello, como se ha mencionado, se estiman solo ciertos valores, y no deben tomarse como precisos.

Se van a presentar los siguientes costes:

- Costes de inversión.
- Costes de mantenimiento operación mantenimiento.
- Otros costes fijos: como pueden ser los costes de eliminación de residuo o los costes de reactivos

El documento donde se basa esta estimación proporciona generalmente los costes anteriores por toneladas de residuos tratados, otorgandode distintos valores según la capacidad de la planta.

Se proporcionan datos para capacidades entre 75.000 t/año y 300.000 t/año, por lo que se han tenido que extrapolar ya que la capacidad de nuestra planta es mayor.

Se presenta a continuación el ejemplo del precipitador electrostático para ilustrar como se ha procedido:

- Los datos se han convertido en Gráficas, como se muestra en la Figura 52.

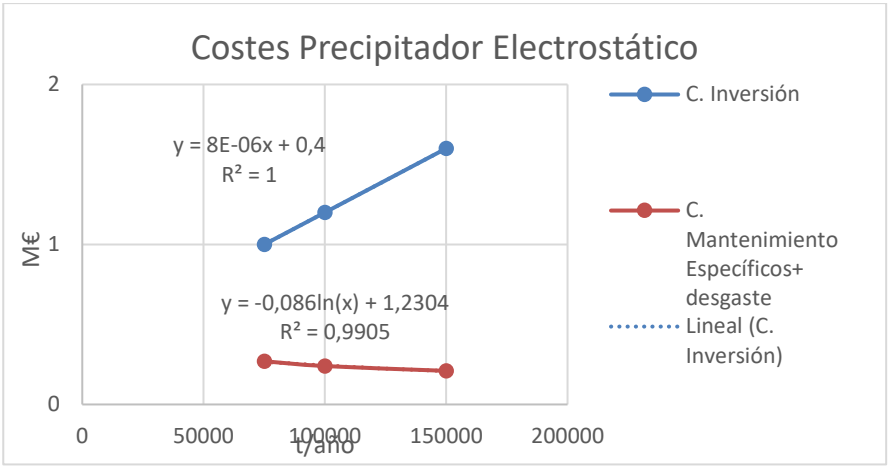

Figura 52. Costes de inversión y mantenimiento para un precipitador electrostático

- Se han obtenido las rectas de regresión que mejor se ajusten para cada caso. Para el ejemplo mostrado, los costes de inversión serán:

$$CI(M€) = 8 \cdot 10^{-6} \cdot Capacidad\left(\frac{t}{año}\right) + 0{,}4$$

- Entrando en las ecuaciones obtenidas con nuestra capacidad, se obtienen los costes deseados.

A los costes de inversión calculados de esta forma, hay que añadir los costes adicionales relativos a construcción, costes eléctricos y mecánicos (CEM) y otras infraestructuras. Para estos, se estiman los siguientes costes:

- costes de construcción + 20 % del coste
- CEM + 15 % del coste de la planta.

Se ha de tener en cuenta que no se han tenido en cuenta para los costes de operación, los costes relativos al consumo eléctrico, ya que estos se consumirán de la propia electricidad producida por la planta. Esto, se ha de aclarar ya que no siepre tiene por que ser así, debido a que veces los precios de venta y consumo de la electricidad puedan favorecer la venta de toda la electricidad producida.

Los costes para el personal se han estimado teniendo en cuenta los requerimientos medios especificados por AEVERSU de 45 trabajadores por 100.000 t/año de capacidad, lo que significan 215 trabajadores. [61]

El fabricante B&W Volund estima que, si una planta se fabrica para funcionar con un bajo coste de inversión en personal, sólo 14 personas (8 operarios y 6 personas de mantenimiento y administración) son necesarios. [32] Esta cifra es muy pequeña en comparación con la usada, sin embargo, no se ha optado por esta ya que no hace referencia a capacidades de planta.

El calculo de la retribución económica se hace mas complicada, ya que no se pueden distinguir cargor y funciones con los datos utilizados, por lo que se han estimado unos 20.000 €/año por trabajador.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 16. Se ha obtenido un coste de inversión, sin tener en cuenta construcción y CEM, de 112,76 M€. Si actualizamos este coste con los índices de CEPCI al año 2012, se obtiene un coste de 158,40 millones de €. [62]

Si comparamos, con una planta en particular, la planta de Amager Bakke en Dinamarca, tuvo un coste de 130 millones de €, en 2012. Esta planta fue construida por B&W Volund. El coste es algo menor, sin embargo, esta tiene una capacidad de 35 t/h. [63], Los costes de construcción, también parecen ser una buena estimación, siendo 22,55 M€, mientras que los de la planta Amager Bakke son de 30,24 M€.

Tabla 16. Resumen de la estimación de costes

	Inversión (M€)	**Mantenimiento (€/año)**	**Costes Fijos (€/año)**
Costes de almacenamiento y descarga	16,02	89.948,21	1.479.372,55
Costes parrilla y caldera	47,15	1.831.474,61	8.980.292,22
Costes ciclo de vapor	26,74	1.246.156,12	
Costes precipitador electrostático	4,54	78.294,87	1.935.731,01
Costes filtro de manga	5,30	435.891,00	
Costes eliminación de gases ácidos	10,30	443.512,06	4.255.796,09
Costes RCNS	2,67	40798,87	214.131,23
TOTAL(M€)	**112,76**	**4,16**	**16,86**
Costes de Personal			4.280.000,00
Costes de Construcción	22,55		
Costes CEM	16,91		
TOTAL(M€)	**152,22**	**4,16**	**21,24**

Con respecto a los costes de mantenimiento y los costes fijos, estos suman 25,40 M€ por año, lo que supone un coste específico de 54,19 € por tonelada de residuos.

Un estudio que recoge datos de 14 plantas europeas sitúa estos costes entre 45 y 70 €/t de residuo, por lo que nuestros resultados se encuentran dentro de este rango. [64]

5 CONCLUSIONES

Según el análisis y los resultados obtenidos en estra trabajo, se ha llegado a unas conclusiones que se detallan a continuación:

- El documento BREF es una guía muy completa, que sirve como base para la correcta elección y combinación de técnicas mas apropiadas para la incineración de residuos. Así, por cada situación especial se presentan una o varias soluciones siempre justificadas. Proporciona también datos y referencias para simular los aspectos principales de operación de una planta.
- Para la alimentación y características de nuestro residuo, la tecnología de parrilla es la que presenta mejores condiciones, principalmente por robustez y por ser una de las mas utilizadas. Debido al alto poder calorífico del residuo esta se refrigerará por agua.
- En cuanto al sistema de TGC, se ha obtenido la mejor combinación teniendo en cuenta siempre la premisa de las MTD, de minimizar el consumo energético. A pesar de ello, las posibilidades de elección de un sistema de tratamiento de gases son numerosas. En este caso, se ha optado por un sistema RNCS para lal eliminación de NOx, un precipitador electrostático para la eliminación de partículas y un sistema de absorción semihúmeda con filtro de mangas para el abatimiento de gases ácidos.
- De los numerosos fabricantes de plantas de incineración de residuos del mercado, el seleccionado ha sido Babcok & Wilcox Volund. Los años de experiencia usando parrillas refrigeradas con agua, las altas capacidadel de procesamiento de sus plantas y la similitud de sus técnicas para tratamiento de gases con las elegidas, han sido los principales motivos para decantarse por éste.
- Las características de los equipos B&W Volund han permitido que se obtengan resultados óptimos en cuanto a emisión de gases de combustiíon, estando muy por debajo de los VLE, también, con respecto a la utilización de reactivos y a la generación de residuos, debido a las altas eficiencias de los equipos, y en cuanto a los rendimientos de combustión, debido al bajo de exceso de aire necesario.
- Debido a estos buenos resultados, las características energéticas que tendrá nuestra planta también serás muy satisfactorias. La electricidad producida queda por encima de las medias reportadas actualmente.
- Por otro lado, a pesar de que las estimaciones de los costes son bastante básicas, los resultados obtenidos se parecen mucho a los costes de plantas que se han construido recientemente.

Este trabajo podrá servir como base de información para posibles futuros proyectos con los mismos residuos utilizados, en el que se pretenda expandir el alcance de aplicación de las MTD o realizar el diseño de equipos en profundidad.

6 REFERENCIAS

[1] Parlameto Europeo, Consejo de la UE, «DIrectiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas».

[2] «La Asociación española de demolición, descontaminación, corte y perforación, AEDED,» [En línea]. Available: http://www.aeded.org/.

[3] European Commission , «Closing the loop -An EU action plan for the circular economy COM (2015).,» Final 2015.

[4] Asociación Internacional de Residuos Sólidos (ISWA), Programa Medioambiental de las Naciones Unidas (UNEP), «Global Management Waste Outlook (GWMO),» 2015.

[5] E. M. Foundation, «Circular Economy System Diagram,» 2013.

[6] International Solid Waste Associaion (ISWA), «Annual Review,» 20107.

[7] European Comission, «Eurostat,» [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home.

[8] «BOE» núm. 164, de 10 de julio de 2013, *RD 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes,* España, p. 51119 a 51207.

[9] «Compostando Ciencia,» [En línea]. Available: http://www.compostandociencia.com/2013/03/maquinas-volteos-compostaje-html/.

[10] «Ecoembes,» [En línea]. Available: https://www.ecoembes.com/sites/default/files/archivos_estudios_idi/plantas-de-seleccion-de-envases-ligeros.pdf.

[11] MAGARAMA, «Plan estatal Marco de gestion de residuos (PEMAR) 2016-2022,» 2016.

[12] European Commission, « The EU environmental implementation review country report- Spain. SWD(2017) 42 final,» Bruselas, 2017.

[13] Zero Waste Europe, *Harmful subsidies to waste-to-energy incineration,* 2016, pp. 1-16.

[14] The European Parlamient and the Council of the European Union, *DIRECTIVE 2010/75/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) (Recast).*

[15] European Commission. , *The role of waste-to-energy in the circular economy,* 2017.

[16] ISWA, *Waste to Energy in Low and Medium Income Countries,* 2013.

[17] Comisión Europea, «Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on the Best

Available Techniques for Waste Incineration.,» Julio 2005.

[18] A. R. Salvador, «La Incineración de Residuos ¿ Está justificado el rechazo social?,» *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (Esp),* vol. 104, nº 1, pp. 175-187, , 2010.

[19] WSP Environmental Ltd, «Waste Technogies: Waste to Energy Facilities,» May 2013.

[20] WSP Environmental Limited, «Review of the State-of-Art Waste-to-Energy Technologies,» January 2013.

[21] UBA , «Draft of a German Report for the creation of a BREF-document waste incineration,» 2001.

[22] V. N. Vishal Soni, «Gasification – A Process for Energy Recovery and Disposal of Municipal Solid Waste,» *American Journal of Modern Energy,* vol. 2, nº 6, pp. 38-42 , 2016.

[23] European Commission, «TWG Comments on Draft 1 of Waste Incineration BREF,» 2003.

[24] K. Onyelowe, «Renewable Energy By-products (REB) Adaptation Successes in Environmental Geotechnics: A Review,» *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications,* vol. 7, nº 6, pp. 1-4, 2017.

[25] European Commission, «TWG Comments on Draft 2 on Waste Incineration BREF».

[26] «Deltaway Energy International, Inc.,» [En línea]. Available: http://deltawayenergy.com/2018/08/waste-to-energy-how-it-works/.

[27] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, «Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Managemen,» 2017.

[28] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, «Guideline, Application of Waste-to-Energy in Vietnam,» 2015.

[29] Gobierno de España, «Ministerio para la Transición Ecológica,» [En línea]. Available: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/.

[30] «Babcock & Wilcox Vølund,» [En línea]. Available: http://www.volund.dk/Waste_to_Energy/Technologies/Feeder_systems.

[31] «Logic Energy,» [En línea]. Available: http://logicpower.net/waste-to-energy/alimentador.

[32] Babcock & Wilcoz Volund, «21’ Century Advanced Concept for Waste-Fired Power Plants».

[33] IAWG, Municipal Solid Waste Incinerator Residues, Volume 67, Elsevier, 1997.

[34] «Martin Biopower,» [En línea]. Available: http://www.martinbiopower.com/technology/technologies/discharger/.

[35] M. Maurer, *Feuerführung en Müllverbrennungsanlagen mit wassergekühlten Vorschubrosten,* 2000.

[36] Ekokogeneracja, «Waste-to-Energy Process in a Rotary Kiln».

[37] K. H. Karstesten, «Slideplayer,» [En línea]. Available: https://slideplayer.com/slide/5101819/.

[38] RVF, «Energy recovery by condensation and heat pumps at WTE plants in Sweden,» 2002.

[39] Hitachi Infractrusture System, [En línea]. Available: http://www.hitachi-infra.com.sg/services/energy/dustcollection/principle/dustcollection.html.

[40] INGETECSA, «Ciclones de alta eficiencia,» [En línea]. Available: www.ingetecsa.com.

[41] United States Environmental Protection Agency, EPA Air Pollution Control Cost Manual, 2002.

[42] Götaverken Miljö AB, «Flue gas treatment with integrated dioxin removal by ADIOX®».

[43] F. e. a.-ö., «State of the art for waste incineration plants,» Austria, 2002.

[44] Babcock & Wilcox, «Selective Catalytic Reduction Technology,» 2012. [En línea]. Available: https://www.babcock.com/en/products/-/media/71de7a4201224137839534ba28fc1f28.ashx.

[45] *Directiva 2008/1/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de enero de 2008 , relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación.*

[46] Babcock & Wilcox Vølund, «New technologies for waste to energy plant,» de *4 th. International symposition on waste treatment technologie*, Sheffield University, 2003.

[47] FLSmitdh, «Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR) Systems».

[48] YARA, «NOx reduction with NOxCare SNCR: a performing technology requiring low investment,» [En línea]. Available: https://www.yara.co.uk/chemical-and-environmental-solutions/nox-reduction-for-industrial-plants/scr-sncr-or-hybrid-systems/sncr-systems/.

[49] Instituto Nacional de Seguridad, Salud y Bienestar en el Trabajo (INSSBT), O.A., M.P., «Límites de exposición profesional para agentes químicos en España,» 2018.

[50] B&W Volund, «Energnist (L90), Esbjerg, Denmark,» [En línea]. Available: http://www.volund.dk/~/media/Downloads/Brochures_-_WTE/L90_-_Esbjerg_-_Denmark.pdf.

[51] B&W Volund, [En línea]. Available: http://docplayer.net/43127399-Next-generation-of-waste-fired-power-plants-filborna-waste-to-energy-plant-in-helsingborg-november-29-th-2013.html.

[52] A. W. M. I. J. P. B. G. M. Charles H. K. Lam, «Use of Incineration MSW Ash: A Review,» *Sustainability ,* vol. 2, pp. 1943-1968, 2010.

[53] La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), [En línea]. Available: http://www.aemet.es/es/portada.

[54] ISWA, WGTT (Working Group Thermal Treatment) , «Management of Bottom Ash from WTE Plants,» 2006.

[55] B&W Volund, «Sundsvall Energi, Sweden,» [En línea]. Available: http://www.volund.dk/~/media/Downloads/Brochures_-_WTE/Korstaverket_-_Sundsvall_-_Sweden.pdf.

[56] Q. W. J. C. Quan Wang, «Experimental study of urea on SNCR removal of NOX,» *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research,* vol. 6, nº 7, pp. 2541-2546, 2014.

[57] Babcock & Wilcox, «Spray Dryer Absorber (SDA),» [En línea]. Available: https://www.babcock.com/products/spray-dryer-absorbers-sda#.

[58] Sargent & Lundy LLC (Sargent & Lundy) , «Dry FLue Gas Desulfurization Technology Evaluation,» Prepared for National Lime Association, 2002.

[59] ENAGAS, «Parámetros de Calidad de Gas a introducir en los conversores PTZ durante el Segundo Semestre de 2018».

[60] The National Institute of Standards and Technology (NIST), «Libro del Web de Química del NIST,» [En línea]. Available: https://webbook.nist.gov/.

[61] Greenpeace, «La incineración de residuos en cifras,» Julio 2010.

[62] [En línea]. Available: https://www.dace.nl/download/?id=10620651.

[63] Power Technology, «Amager Bakke Waste-to-Energy Plant,» [En línea]. Available: https://www.power-technology.com/projects/amager-bakke-waste-energy-plant/.

[64] Stantec Consulting Ltd., «A Technical Review of Municipal Solid Waste Thermal Treatment Practices,» 2011.

[65] «Compostando Ciencia,» [En línea]. Available: http://www.compostandociencia.com/2013/03/maquinas-volteos-compostaje-html/.

Anexos

Anexo I

Se muestran a continuación tablas con la comparación de las tecnologías de combustión y tratamiento térmico y factores que afectan su aplicabilidad e idoneidad operativa. Estas se presentan en la sección 4 del documento BREF.

Técnica	Características claves e idoneidad de los residuos	Capacidad por línea	Información operativa/medioambiental		Calidad de la ceniza de fondo	Volumen de gases de combustión	Información sobre costes
			Ventajas	Desventajas/limitaciones de uso			
Parrilla móvil refrigerada por aire	• poderes caloríficos bajos a medios (VCI 5-16,5 GJ/t) • residuos urbanos y otros residuos sólidos heterogéneos • puede aceptar una parte de lodo de depuradora y/o residuos clínicos con residuos urbanos • se aplica en la mayoría de IRSU modernas	1-50 t/h, para la mayoría de proyectos 5-30 t/h. La mayoría de aplicaciones industriales no bajan de 2,5-3 t/h	• muy ampliamente probada a gran escala • robusta, bajo coste de mantenimiento • largo historial operativo • puede aceptar residuos heterogéneos sin preparación especial	Generalmente no adecuada para polvo, líquidos o materiales que se fundan y atraviesen la parrilla	• TOC 0,5 %-3 %	4000-7000 Nm^3/t de residuos. Depende del VCI. Típicamente 5200 Nm^3/t	Su alta capacidad reduce el coste específico por tonelada de residuos
Parrilla móvil refrigerada por líquido	Igual que las parrillas refrigeradas por aire, excepto que: • VCI 10-20 GJ/t	1-50 t/h, para la mayoría de proyectos 5-30 t/h. La mayoría de aplicaciones industriales no bajan de 2,5-3 t/h.	Igual que las parrillas refrigeradas por aire, pero: • puede tratar residuos de mayor poder calorífico • es posible un mejor control de combustión	Igual que las parrillas refrigeradas por aire, pero: • riesgo de fugas que dañen la parrilla • mayor complejidad	• TOC 0,5 %-3 %	4000-7000 Nm^3/t de residuos. Depende del VCI. Típicamente 5200 Nm^3/t	Coste de inversión ligeramente mayor que las refrigeradas por aire
Parrilla más horno rotativo	Igual que otras parrillas, excepto que: • puede aceptar residuos muy heterogéneos y todavía conseguir una combustión eficaz • no se utiliza ampliamente	1-10 t/h	• mejor combustión de ceniza de fondo posible	• menor capacidad de parrilla sólo • mantenimiento del horno rotativo	• TOC 0,5 %-3 %	4000-7000 Nm^3/t de residuos. Depende del VCI. Típicamente 5200 Nm^3/t.	Mayores costes de inversión y operativos
Parrilla estática con mecanismo de transporte de residuos/ cenizas	• los residuos urbanos precisan selección o trituración • menos problemas con polvo, etc. que las parrillas móviles	Generalmente baja <1 t/h	• menor mantenimiento, sin partes móviles	• sólo para residuos seleccionados • menor capacidad • algunas parrillas estáticas requieren combustible auxiliar	• <3 % con residuos preparados	Ligeramente menor que otros sistemas de parrilla si se usa combustión por etapas (mayor si se usa combustible de apoyo)	Competitiva con las parrillas móviles a pequeña escala (<100 Kt/año)

Técnica	Características claves e idoneidad de los residuos	Capacidad por línea	Información operativa/medioambiental		Calidad de la ceniza de fondo	Volumen de gases de combustión	Información sobre costes
			Ventajas	Desventajas			
Horno rotativo	• puede aceptar líquidos y pastas • alimentaciones sólidas más limitadas que en parrillas (debido a daños en el revestimiento refractario) • se suele aplicar a residuos peligrosos	<10 t/h	• muy bien probada • amplia gama de residuos • buena combustión, incluso de RP	Menor capacidad que las parrillas	• TOC <3 %	6-10000 m^3/ t de residuos	Mayor coste específico por su menor capacidad
Horno rotativo (camisa refrigerada)	Igual que el rotativo, pero: • posibilidad de residuos de mayor PC debido a la mayor temperatura	<10 t/h	• muy bien probada • puede utilizar temperaturas de combustión más altas (si se requiere) • mayor vida del refractario que sin refrigeración	Menor capacidad que las parrillas	• escoria vitrificada de baja lixiviación	6-10000 m^3/t de residuos	Mayor coste específico por su menor capacidad
Lecho fluidizado-borboteo	• sólo residuos consistentes finamente divididos. Uso limitado para RSU crudos • se suele aplicar a lodos	1-10 t/h	• buena mezcla • cenizas volantes con buena calidad de lixiviación	• se requiere una operación cuidadosa para evitar el atasco del lecho • Mayor cantidad de ceniza volante	• TOC <3 %	Relativamente menor que en parrillas	El coste del TGC puede ser menor. Costes de preparación de residuos
Lecho fluidizado-rotativo	• amplio rango de valores caloríficos (7-18 MJ/kg) • puede tratar RSU triturados gruesos • incineración combinada de lodo	3-22 t/h	• buena mezcla/alta turbulencia • amplia gama de VCI • alta combustión, ceniza de fondo seca	• se requiere trituración de los RSU • Mayor cantidad de ceniza volante que las parrillas	• TOC <3 % • a menudo 0,5-1 %	4000-6000Nm^3/t	
Lecho fluidizado-circulante	• sólo residuos consistentes finamente divididos. Uso limitado para RSU crudos • se suele aplicar a lodos/ RDF	1-20 t/h, generalmente más de 10 t/h	• buena mezcla • mayor flexibilidad de combustible que la caldera de lecho fluidizado • cenizas volantes con buena calidad de lixiviación	• se requiere ciclón para conservar el material del lecho • mayor cantidad de ceniza volante	• TOC <3 %	Relativamente menor que en parrillas	El coste del TGC puede ser menor. Costes de preparación de residuos.

Técnica	Características claves e idoneidad de los residuos	Capacidad por línea	Información operativa/ medioambiental		Calidad de la ceniza de fondo	Volumen de gases de combustión	Información sobre costes
			Ventajas	Desventajas			
Horno oscilante	• RSU • residuos heterogéneos	1-10 t/h	• robusto-bajo mantenimiento • largo historial • bajo nivel de NO_X • baja pérdida por calcinación (LOI) de la ceniza de fondo	• mayor pérdida térmica que en horno de parrilla • VCI por debajo de 15 G/t	• TOC 0,5-3 %	*Información no facilitada*	Similar a otras tecnologías
Solera pulsante	• sólo residuos de alto PC (PCI >20 GJ/t) • usado principalmente para residuos clínicos	<7 t/h	• puede tratar líquidos y polvo	• la agitación del lecho puede ser menor	• depende del tipo de residuos	*Información no facilitada*	Mayor coste específico debido a su menor capacidad
Soleras escalonadas y estáticas	• sólo residuos de alto PC (PCI >20 GJ/t) • usado principalmente para residuos clínicos	Información no facilitada	• puede tratar líquidos y polvo	• la agitación del lecho puede ser menor	• depende del tipo de residuos	*Información no facilitada*	Mayor coste específico debido a su menor capacidad
Incinerador Spreader-stoker	• RDF y otras materias con partículas • gallinaza • restos de madera	Información no facilitada	• construcción de parrilla simple • menos sensible al tamaño de partícula que el lecho fluidizado	• sólo para corrientes simples bien definidas	• *Información no facilitada*	*Información no facilitada*	*Información no facilitada*
Gasificación-lecho fijo	• residuos plásticos mixtos • otras corrientes consistentes similares • gasificación menos ampliamente usada/probada que la incineración	hasta 20 t/h	• residuo final de baja lixiviación • buena combustión si se inyecta oxígeno • gas de síntesis disponible • oxidación reducida de metales reciclables	• alimentación limitada • combustión no completa • alto nivel técnico • alquitrán en gas crudo • menos probada	• ceniza de fondo de baja lixiviación • buena combustión con oxígeno	Menor que la combustión directa	Altos costes de operación y mantenimiento

Técnica	Características claves e idoneidad de los residuos	Capacidad por línea	Información operativa/ medioambiental		Calidad de la ceniza de fondo	Volumen de gases de combustión	Información sobre costes
			Ventajas	Desventajas			
Gasificación-flujo ascendente	• residuos plásticos mixtos • otras corrientes consistentes similares • no adecuada para RSU sin tratar • gasificación menos ampliamente usada/probada que la incineración	hasta 10 t/h	• escoria de baja lixiviación • oxidación reducida de metales reciclables	• alimentación limitada • combustión no completa • alto nivel técnico • menos probada	• escoria de baja lixiviación	Menor que la combustión directa	Altos costes de operación y mantenimiento Costes de pretratamiento elevados
Gasificación-lecho fluidizado	• residuos plásticos mixtos • RSU triturados • residuos de trituradora • lodos • residuos ricos en metales • otras corrientes consistentes similares • gasificación menos ampliamente usada/probada que la incineración	5-20 t/h	• puede usar bajas temperaturas de reactor, ej. para recuperar Al • separación de los principales no combustibles • puede combinarse eficazmente con fusión de cenizas • oxidación reducida de metales reciclables	• tamaño de residuos limitado (<30cm) • alquitrán en gas crudo • gas crudo de mayor PCS • menos probada	• si se combina con fusión de ceniza, la ceniza de la cámara se vitrifica • calidad de ceniza sin cámara de ceniza-información no facilitada	Menor que la combustión directa	Menos que otros gasificadores
Pirólisis-tambor corto	• RSU pretratados • corrientes inertes ricas en metales • residuos de trituradora/plásticos • pirólisis menos ampliamente usada/probada que la incineración	~ 5 t/h	• no hay oxidación de metales • no consume energía de combustión para metales inertes • en el reactor es posible la neutralización de ácidos • gas de síntesis disponible	• residuos limitados • control de proceso e ingeniería críticos • alto nivel técnico • poco probada • se necesita mercado para el gas de síntesis	• depende de la temperatura del proceso • el residuo producido requiere proceso ulterior, a veces combustión	Muy bajo debido al bajo exceso de aire requerido para la combustión del gas	Elevados costes de pretratamiento, operación e inversión
Pirólisis-tambor medio		5-10 t/h					