

Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería Química

# **Diseño de una planta de incineración de lodos de depuradora.**

Autora:

Alba Caballero Mayoral

Tutora:

Alicia Ronda Gálvez

Profesora Contratada Doctora Interina

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

---

# Resumen

---

En este trabajo se estudia el diseño de una planta para la incineración de lodos de depuradora. Para ello, se ha tomado de partida la caracterización de los lodos de depuradora de Sevilla, proporcionados por Emasesa. Tras la caracterización de los lodos se ha propuesto un esquema para el proceso de incineración, contemplando diferentes técnicas y tecnologías que permitan obtener la mejor alternativa para la valorización energética de estos residuos mediante un proceso de incineración. Se han estudiado los equipos necesarios para el proceso, seleccionando de entre los disponibles según el mercado, los más adecuados para el esquema de incineración propuesto. Se ha tenido en cuenta la integración de la valorización energética de la planta, y para ello, se ha estudiado el aprovechamiento en la propia instalación del calor desprendido durante la incineración para la producción de energía eléctrica mediante un ciclo Rankine. A continuación, se han realizado los balances de materia y energía correspondientes para la cuantificación de todas las corrientes del proceso. Dichos balances han permitido comprobar que la planta propuesta cumple la normativa de emisión de los gases a la atmósfera según el BOE, así como otras recomendaciones propuestas en el BREF sobre las Mejores Técnicas Disponibles.

# ÍNDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Agradecimientos</b> .....  | <b>9</b>  |
| <b>Resumen</b> .....  | <b>11</b> |
| <b>Abstract</b> .....   | <b>13</b> |
| <b>Índice</b> .....   | <b>15</b> |
| <b>Índice de Tablas</b> .....   | <b>17</b> |
| <b>Índice de Figuras</b> .....  | <b>19</b> |
| <b>Notación</b> .....   | <b>21</b> |
| <b>1 Introducción</b> .....   | <b>23</b> |
| <b>2 Objetivo y Alcance</b> .....   | <b>27</b> |
| <b>3 Caracterización de los lodos</b> .....                                 | <b>29</b> |
| 3.1. <i>Caracterización del lodo inicial</i> .....                          | 29        |
| <b>4 Propuesta del proceso de incineración: diseño de la planta</b> .....   | <b>31</b> |
| 4.1. <i>Área de recepción, almacenamiento y alimentación de lodos</i> ..... | 32        |
| 4.2. <i>Área de secado de lodos de depuradora</i> .....                     | 32        |
| 4.3. <i>Sistema de combustión en Horno- Caldera</i> .....                   | 33        |
| 4.4. <i>Aprovechamiento energético</i> .....                                | 33        |
| 4.5. <i>Tratamiento de gases</i> .....                                      | 34        |
| 4.6. <i>Evacuación de gases</i> .....                                       | 35        |
| <b>5 Análisis y diseño de los equipos</b> .....                             | <b>37</b> |
| 5.1. <i>Secador de aire</i> .....   | 37        |
| 5.2. <i>Horno- Caldera</i> .....  | 37        |
| 5.3. <i>Limpieza de metales pesados</i> .....                               | 38        |
| 5.4. <i>Chimenea</i> .....  | 40        |
| <b>6 Memoria de Cálculos</b> .....  | <b>41</b> |
| 6.1. <i>Balace de Materia</i> .....   | 41        |
| 6.2. <i>Balace de Energía</i> .....   | 52        |
| <b>Anexo I</b> .....  | <b>59</b> |
| <b>Referencias</b> .....  | <b>63</b> |
| <b>Glosario</b> .....   | <b>66</b> |

---

# ÍNDICE DE TABLAS

---

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Caracterización inicial de los lodos. Fuente: Emasesa. ....                    | 29 |
| Tabla 2. Caracterización de los lodos en base seca. Fuente: Emasesa. ....               | 30 |
| Tabla 3. Poderes caloríficos específicos. Fuente: [8], [9]. ....                        | 30 |
| Tabla 4. Datos de nitrógeno para definir la cantidad de amoníaco a introducir. ....     | 45 |
| Tabla 5. Caudales de Oxígeno formado en cada reacción. ....                             | 46 |
| Tabla 6. Composición de gases de combustión a la salida del horno. ....                 | 47 |
| Tabla 7. Compuestos y cantidad que reacciona al inyectar cal. ....                      | 48 |
| Tabla 8. Composición de salida de los gases de la chimenea. ....                        | 49 |
| Tabla 9. Composición de los metales pesados que componen el lodo. Fuente: Emasesa. .... | 50 |
| Tabla 10. Caracterización energética del sistema de combustión. ....                    | 56 |
| Tabla 11. Balance de materia de todas las corrientes de la planta. ....                 | 61 |

---

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Esquema de la generación de lodos procedentes del tratamiento de aguas residuales y línea de tratamiento de lodos. Fuente: Ministerio de calidad y evaluación ambiental [1]. ..... | 23 |
| Figura 2. Variación de producción de lodos según comunidades autónomas. Fuente: Asociación Española de Abastecimiento de Agua y Saneamiento (AEAS).....                                      | 25 |
| Figura 3. Diagrama de distribución de áreas.....   | 31 |
| Figura 4. Esquema Ciclo de Rankine. Fuente: “Application of Organic Rankine Cycles (ORC)” [15] .....   | 34 |
| Figura 5. Diagrama de bloques simplificado de la planta. ....  | 36 |
| Figura 6. Esquema del mecanismo de un ciclón. Fuente: Revista de Ingeniería de la Universidad de Medellín. [21].....   | 39 |
| Figura 7. Esquema de la operación de un filtro de mangas. Fuente: Díaz Y. y González E, 2016 [23]. .....   | 40 |
| Figura 8. Diagrama de entrada- salida del secador de lodos.....  | 43 |
| Figura 9. Diagrama de especificación de corrientes en el ciclón.....   | 48 |
| Figura 10. Diagrama de especificación de corrientes en filtro de mangas.....   | 49 |
| Figura 11. Diagrama del proceso de combustión. ....  | 54 |

# NOTACIÓN

|                      |   |
|----------------------|---|
| C                    | Carbono                                       |
| H <sub>2</sub>       | Hidrogeno                                     |
| N <sub>2</sub>       | Nitrógeno                                     |
| S                    | Azufre  |
| O                    | Oxigeno                                       |
| CO <sub>2</sub>      | Dioxido de Carbono                            |
| NO                   | Monoxido de Nitrógeno                         |
| NO <sub>2</sub>      | Dioxido de Nitrogeno                          |
| NH <sub>3</sub>      | Amoniac                                       |
| H <sub>2</sub> O     | Agua  |
| SO <sub>2</sub>      | Dioxido de azufre                             |
| Ca(OH) <sub>2</sub>  | Cal   |
| CaSO <sub>3</sub>    | Calcita                                       |
| CO                   | Monóxido de carbono                           |
| Mg                   | Como queríamos demostrar                      |
| Al                   | Aluminio                                      |
| Fe                   | Hierro  |
| Ni                   | Niquel  |
| Cu                   | Cobre   |
| Zn                   | Zinc  |
| $\lambda$            | Calor latente                                 |
| T <sub>L1</sub>      | Temperatura de lodos de entrada al horno      |
| T <sub>L2</sub>      | Temperatura de lodos de salida del horno      |
| T <sub>ref</sub>     | Temperatura de referencia                     |
| T <sub>ew</sub>      | Temperatura de la corriente de agua           |
| T <sub>ewevap</sub>  | Temperatura de la corriente de agua evaporada |
| T <sub>horno</sub>   | Temperatura del horno                         |
| T <sub>cenizas</sub> | Temperaturas de las cenizas                   |
| $\Delta T$           | Incremento de temperatura                     |
| Q <sub>cc</sub>      | Calor de combustión                           |
| Q <sub>secador</sub> | Calor del secador                             |
| Q <sub>IN</sub>      | Calor que entra en el sistema de combustión   |
| Q <sub>OUT</sub>     | Calor que sale del sistema de combustión      |
| Q <sub>PERD</sub>    | Perdidas de calor del sistema de combustión   |
| Q                    | Energía que se desprende del sistema          |
| m <sub>L1</sub>      | Masa de lodos que entra en el horno           |

---

|                  |  |
|------------------|--|
| $m_{H_2}$        | Masa de agua que sale del horno                                    |
| $m_{H_2O_{EVP}}$ | Masa de agua evaporada que sale del horno                          |
| $m_{aire}$       | Masa de aire   |
| $m_{gas}$        | Masa de gases de combustión  |
| $m_{cen}$        | Masa de las cenizas  |
| $cp_{lodos}$     | Poder calorífico de los lodos                                      |
| $cp_w$           | Poder calorífico del agua  |
| $cp_{vap}$       | Poder calorífico del vapor de agua                                 |
| $cp_{AIRE}$      | Poder calorífico del aire  |
| $cp_{gas}$       | Poder calorífico medio de los gases                                |
| $cp_{cen}$       | Poder calorífico medio de las cenizas                              |
| $Y_C$            | Cantidad centesimal de Carbono en peso por kilogramo combustible   |
| $Y_H$            | Cantidad centesimal de Hidrogeno en peso por kilogramo combustible |
| $Y_O$            | Cantidad centesimal de Oxigeno en peso por kilogramo combustible   |
| $Y_N$            | Cantidad centesimal de Nitrogeno en peso por kilogramo combustible |
| $\eta_{COM}$     | Eficiencia de combustión   |
| $\eta_C$         | Eficiencia de combustión   |
| $\eta_T$         | Eficiencia térmica   |
| $\eta_I$         | Eficiencia interna   |
| $\eta_P$         | Eficiencia de pérdidas por radiación, agua de la caldera y cenizas |
| $\eta_V$         | Eficiencia del vapor   |
| $\eta_E$         | Eficiencia eléctrica   |
| $M_{vapor}$      | Masa de vapor que se puede producir                                |
| $E_{vapor}$      | Energía útil para producir vapor                                   |
| $P_{electrica}$  | Potencia eléctrica   |
| $h_{450}$        | Entalpía a 450°C y 50 bar  |
| $h_{150}$        | Entalpía a 150°C y 50 bar  |

# 1 INTRODUCCIÓN

*El problema de las palabras es que, una vez echadas, no pueden volverse solas a su dueño. De modo que a veces te las vuelven en la punta de un acero.*

- Arturo Pérez- Reverte -

Los lodos de depuradora consisten en una mezcla de agua y sólidos que se obtienen durante el proceso de depuración de un agua residual. Estos lodos son generados en las estaciones depuradoras que tratan aguas residuales, fosas sépticas o en la industria agroalimentaria.

En España, según el Registro Nacional de Lodos se producen aproximadamente 1.200.000 toneladas anuales de lodos de depuradora. En el esquema de la figura 1 se muestra cómo se generan y se tratan estos lodos procedentes del tratamiento de aguas residuales:

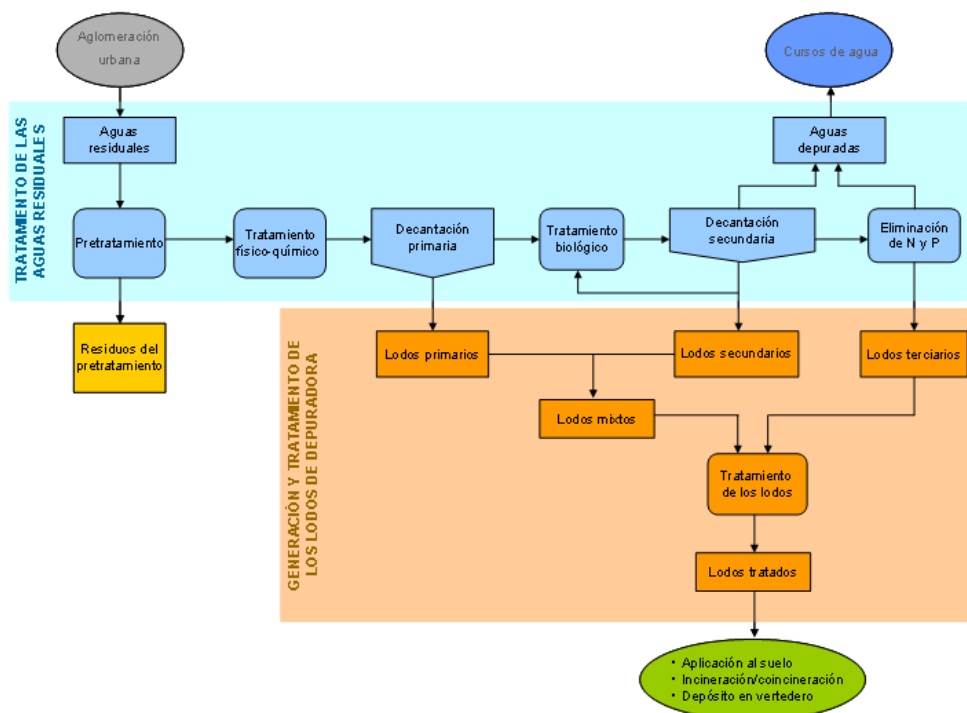


Figura 1. Esquema de la generación de lodos procedentes del tratamiento de aguas residuales y línea de tratamiento de lodos. Fuente: Ministerio de calidad y evaluación ambiental [1].

Estos lodos son residuos semisólidos muy líquidos (más de un 90% de agua), separados del agua residual mediante diversos procesos de tratamientos. Su composición es variable según la zona, y por tanto contienen amplia diversidad de materias suspendidas o disueltas. Se basa mayoritariamente en materia orgánica y minoritariamente en metales pesados, calcio, fósforo, nitrógeno, hierro, potasio etc.



Los lodos tratados de depuradora son lodos procedentes de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) que han sido sometidos a tratamientos específicos para conseguir a través de métodos biológicos, químicos o térmicos, reducir de manera significativa su poder de fermentación y su potencial de causar molestias y daños para la salud y el medio ambiente. Son, por tanto, lodos estabilizados [1].

La gestión de estos lodos se ha convertido en uno de los principales retos a los que se debe enfrentar la sociedad debido al impacto ambiental, social y económico, así como a la creciente producción de lodos. Las EDAR son productores de lodos y como tales productores de residuos son los responsables de realizar el tratamiento adecuado conforme a lo que establece [Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados](#). Esta ley está orientada a la política de residuos relativos a la protección del medio ambiente y la salud humana, priorizando en las opciones de gestión la prevención sobre el reciclado, seguido de la valorización energética y en último lugar el depósito en vertedero [2].

La implantación de la valorización energética ha ido creciendo en los últimos años en España, pero aún representa unos niveles inferiores a la media de la Unión Europea. Dicha mejora, podría contribuir de forma significativa a una apropiada gestión de los residuos y también una aportación relevante al panorama energético español [3].

Principalmente hay dos tipos de lodos, por un lado, los originados por actividades industriales y por otro lado los lodos que proceden de las aguas residuales, que son originados de forma doméstica. Este proyecto se va a enfocar en lodos de aguas residuales ya que los lodos industriales tienen que ser tratados en función de las características específicas que tenga.

Actualmente, según datos del Registro Nacional de Lodos ha primado como destino final su utilización agrícola (aproximadamente el 80% de los generados). Con esta medida, se ha logrado reducir en gran medida el depósito en vertedero (aproximadamente el 8% actualmente). Otra alternativa que está creciendo en los últimos años es la incineración (en torno a un 4%). Otro destino de menor importancia cuantitativa es el uso de los lodos en suelos no agrícolas [1].

En Andalucía hay una producción de biosólidos de 113.713 TMS/año, siendo la segunda comunidad autónoma después de Cataluña con más producción. Con biosólidos se refiere a la producción de lodos que provienen de una EDAR. En la figura 2 se muestra como varía la producción en las diferentes comunidades autónomas de España [4].

| Comunidad Autónoma         | Producción Biosólidos<br>TM S/año |
|----------------------------|-----------------------------------|
| Cataluña                   | 136.738                           |
| Andalucía                  | 113.713                           |
| Comunidad de Madrid        | 105.250                           |
| Comunidad Valenciana       | 99.839                            |
| Castilla La Mancha         | 56.000                            |
| País Vasco                 | 37.347                            |
| Extremadura                | 36.000                            |
| Aragón                     | 28.527                            |
| Región de Murcia           | 25.450                            |
| Castilla y León            | 22.045                            |
| Cantabria                  | 21.021                            |
| Illes Balears              | 20.333                            |
| Galicia                    | 18.195                            |
| Canarias                   | 16.910                            |
| Principado de Asturias     | 9.997                             |
| Comunidad Foral de Navarra | 7.300                             |
| La Rioja                   | 5.250                             |
| <b>Total</b>               | <b>759.915</b>                    |

Figura 2. Variación de producción de lodos según comunidades autónomas. Fuente: Asociación Española de Abastecimiento de Agua y Saneamiento (AEAS)

Por ello, en este TFG, se propone la incineración como alternativa a la gestión de los lodos de depuradora, con el objetivo de reducir la fracción que va a vertedero y para mejorar el aprovechamiento energético de este residuo. Este tipo de método puede ser una alternativa de gestión en aquellos procesos en los que haya una demanda de energía, ya que la energía y/o calor producidos pueden ser empleados en el propio proceso de producción, reduciendo así también los gastos de transporte del lodo desde su producción hasta su destino final.

La incineración es un proceso de eliminación de fangos por combustión (quemado) de los mismos. Los fangos del tratamiento de aguas residuales provenientes de la deshidratación contienen cantidades elevadas de agua, lo que hace aconsejable su desecación antes de incinerarlos. Normalmente los gases de salida del incinerador se utilizan para secar el fango. Debido al poder calorífico de ellos sólo se necesita una pequeña cantidad de combustible para su incineración.

En España existen 11 incineradoras de RSU en funcionamiento en 7 Comunidades Autónomas diferentes. Sin embargo, no existe ninguna planta incineradora de lodos, a pesar de generarse en España anualmente alrededor de 1.200.000 toneladas en materia seca de esos lodos de depuradora [1], [5].

El esquema de proceso a seguir para los lodos es muy similar a los de RSU. Este proceso se puede dividir en diferentes etapas:

- Primera etapa: Deshidratación de fangos.
- En la segunda etapa: sistema horno- caldera.
- La tercera etapa: limpieza de metales pesados
- La cuarta etapa: evacuación de cenizas.

Los fangos de depuradora se caracterizan por un elevado contenido en materia volátil y además un Poder Calorífico Inferior (PCI) elevado, esto sugiere un aprovechamiento energético de los fangos.

La valorización energética de los fangos de depuradora puede llevarse a cabo quemando el fango en hornos de combustión, en hornos industriales (utilizando el fango como combustible de apoyo a otros combustibles convencionales) o en hornos de incineración con otros residuos. En cualquiera de estos casos, la energía liberada en la combustión tiene que evaporar toda el agua contenida en el fango. Como la mayor parte de la energía se gasta en la evaporación de agua, el mayor ahorro energético se logra deshidratando el fango al máximo antes de entrar al horno. Para alcanzar esta sequedad se suele utilizar, como etapa previa, cualquiera de los procedimientos de secado térmico [6].

## 2 OBJETIVO Y ALCANCE

---

*“La educación es el arma más poderosa para cambiar el mundo”.*

*-Nelson Mandela-*

**E**l objetivo de este proyecto es proponer el diseño de una planta de incineración de lodos de depuradora, como alternativa a la gestión de estos residuos, con el objetivo de reducir la fracción que va a vertedero y para mejorar el aprovechamiento energético de los mismos. Para ello, se requiere una evaluación absoluta del proceso, para cumplir paralelamente tanto con los requisitos de las regulaciones como para minimizar los costes económicos, ambientales, de salud y sociales.

En este proyecto vamos a centrarnos en 6 objetivos específicos:

1. Caracterización de los lodos a valorizar.
2. Propuesta del proceso de incineración de residuos.
3. Análisis y diseño de los equipos necesarios para la planta propuesta de incineración de lodos.
4. Selección las mejores alternativas tecnológicas, teniendo en cuenta nuestro diseño y las características del lodo.
5. Evaluación las entradas y salidas de materias primas y lodos de la instalación.
6. Evaluación de la energía producida y consumida.

Por tanto, el alcance de este proyecto pretende analizar la viabilidad técnica y ambiental de una planta incineradora de lodos de depuradora. Queda fuera del alcance de dicho proyecto el análisis económico de la misma.



# 3 CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS.

*“Equipado con sus cinco sentidos, el hombre explora el universo que lo rodea y a sus aventuras las llama ciencia”.*

*-Edwin Powell Hubble-*

**E**n este proyecto, se propone la valorización de los lodos generados en las plantas depuradoras de Sevilla. Por lo que el primer objetivo será evaluar la composición y la cantidad de lodos generados en la zona.

Según los datos facilitados por la empresa Emasesa, se obtiene información de la producción de lodos de las 4 EDAR más importantes de la zona, es decir, una producción de 38.000 toneladas anuales en Copero, 11.200 toneladas en San Jerónimo, 13.000 toneladas en Ranilla y por último 7.800 toneladas en la EDAR de Tablada. Esto quiere decir que hay una producción total de lodos de aproximadamente 70.000 toneladas anuales.

En este proyecto, se propone la valorización de los lodos generados en las plantas depuradoras de Sevilla. Para ello se partirá de la caracterización de los lodos facilitados por Emasesa.

## 3.1. Caracterización del lodo inicial.

Para el diseño de la planta de incineración se ha tomado como partida los lodos producidos en las depuradoras de Sevilla. La planta de valorización de lodos se situará en Sevilla, con una producción total de lodos de 70.000 toneladas anuales.

A continuación, en la *tabla 1* y *tabla 2*, se muestra la caracterización inicial de lodos.

| PARÁMETRO                         | VALOR MEDIO |
|-----------------------------------|-------------|
| <b>Lodos a incinerar (T/ año)</b> | 70.000      |
| <b>Humedad total (%)</b>          | 16,5        |
| <b>pH</b>                         | 8,2         |
| <b>Conductividad (mS/cm)</b>      | 2,8         |

Tabla 1. Caracterización inicial de los lodos. Fuente: Emasesa.

| COMPONENTE     | VALOR MEDIO (%) | COMPOSICIÓN (kg/h) |
|----------------|-----------------|--------------------|
| <b>C</b>       | 33,2            | 2215,22            |
| <b>H</b>       | 5,26            | 351,10             |
| <b>N</b>       | 5,38            | 358,97             |
| <b>S</b>       | 1,53            | 102,09             |
| <b>O</b>       | 31,3            | 2088,45            |
| <b>Cenizas</b> | 23,3            | 1554,56            |

Tabla 2. Caracterización de los lodos en base seca. Fuente: Emasesa.

Antes de empezar a realizar el procedimiento de cálculos, se van a mostrar los poderes caloríficos medios con los que se va a trabajar en la *tabla 3*.

| COMPUESTO             | Cp (kJ/kg K) |
|-----------------------|--------------|
| <b>Lodos</b>          | 3,62         |
| <b>Vapor de agua</b>  | 1,84         |
| <b>Agua</b>           | 4,18         |
| <b>CO<sub>2</sub></b> | 0,85         |
| <b>CO</b>             | 1,05         |
| <b>SO<sub>2</sub></b> | 0,60         |
| <b>O<sub>2</sub></b>  | 0,92         |
| <b>N<sub>2</sub></b>  | 1,04         |
| <b>Aire</b>           | 1,2          |
| <b>Cenizas</b>        | 3,2          |

Tabla 3. Poderes caloríficos específicos. Fuente: [8], [9].

En Primer lugar, tanto las capacidades caloríficas del agua y del vapor de agua como de los gases de combustión se obtienen de tablas termodinámicas. Para la capacidad calorífica de los gases se hace una media con los porcentajes de cada compuesto y se aproxima a un valor de  $1,15 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$  [8].

Por otro lado, según el estudio de XingzhouYang et. al, 2019, la capacidad calorífica específica del lodo se aproxima a  $3.62 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$  [9].

Por ultimo, se obtiene la capacidad calorífica de las cenizas según una serie de artículos y se aproxima a  $3,2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ .

## 4 PROPUESTA DEL PROCESO DE INCINERACIÓN: DISEÑO DE LA PLANTA

*“La posibilidad de realizar un sueño es lo que hace que la vida sea interesante”.*

*-Paulo Coelho-*

**E**n este apartado se explica el proceso que debe seguirse para nuestra planta de incineración de lodos, distinguiendo 6 etapas, como se representa en el diagrama de la figura 3.

1. Área de recepción, almacenamiento y alimentación de lodos.
2. Área de secado de lodos de depuradora.
3. Sistema de combustión en Horno- Caldera.
4. Aprovechamiento energético.
5. Tratamiento de gases.
6. Evacuación de gases.

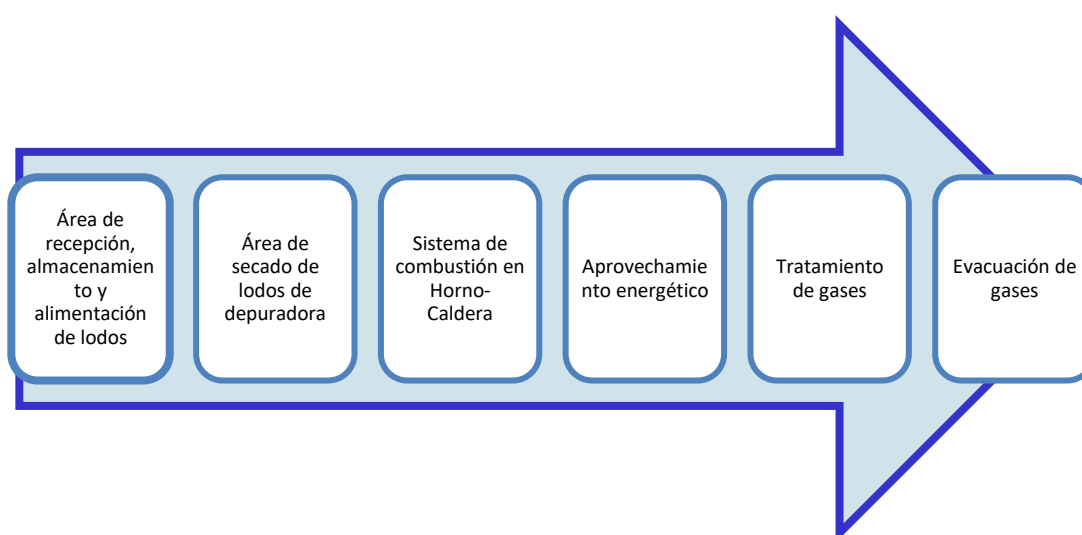


Figura 3. Diagrama de distribución de áreas.



A continuación, se va a explicar en qué consiste el proceso dividido por áreas explicando cada una de ellas.

#### **4.1. Área de recepción, almacenamiento y alimentación de lodos.**

El proceso comienza con la recepción de los lodos, habitualmente en camiones, los cuales han de pasar por la zona de pesaje (tanto para acceder como para abandonar las instalaciones se deberá de realizar el pesaje del camión) y el arco de detección de materiales radiactivos (para evitar la entrada de estos) situados en la entrada principal de la planta, antes de continuar su camino hacia la zona de descarga de lodos. La importancia de los sistemas de pesaje en la gestión de residuos y el reciclaje no puede ser cuestionada, dado que es crucial mantener un recuento preciso, para poder realizar el cálculo de los costos y la eficiencia de la instalación. En esta misma zona se situará la caseta de vigilancia y control de entrada y salida de vehículos.

Los lodos procedentes de la planta depuradora salen con mucho contenido en agua, y antes de ser transportados se someten a un proceso de secado para quitarle a ese fango un porcentaje en agua y sea más fácil el transporte a nuestra planta.

La nave de descarga dispone del espacio suficiente para que los camiones accedan a ella y efectúen la maniobra de descarga en el interior, reduciendo así el impacto visual y olfativo. Son decantados en un tanque clarificador con un 40- 50% de sólidos, los cuales suelen tener una capacidad de almacenamiento equivalente a los residuos recogidos durante tres-cinco días [10], [11].

#### **4.2. Área de secado de lodos de depuradora.**

Como se ha mencionado anteriormente, aunque los lodos son estabilizados a la salida de la depuradora, los lodos llegan a nuestra planta con un contenido todavía elevado de agua (de un 16,5 %) por ello son tratados pasando previamente por un proceso de secado.

A continuación, la infraestructura de este sistema de secado consiste en una cabina aislada completamente, donde se sitúa el sistema de distribución de fangos, dos cintas transportadoras, ventiladores de circulación de aire de secado, los intercambiadores de calor para el calentamiento del aire y el tornillo de extracción de fango seco.

Las dos cintas transportadoras se disponen una encima de la otra y conforman dos zonas de secado diferenciadas, por un lado, la cinta superior recorre la zona de secado mientras que la cinta inferior pasa por la zona final de secado. En cada zona están situados dos ventiladores de circulación de aire de secado y un intercambiador de calor.

A lo largo del proceso la temperatura disminuye por lo que, en la zona final, donde se alcanza una sequedad de fango máxima, la temperatura del aire es la mínima, con lo que se maximiza la seguridad.

El sistema de secado se encarga de recuperar la energía residual del proceso de secado. Dicha energía, en combinación con la gestión anaerobia de lodos, permitiendo maximizar el uso del biogás en el secado térmico y de esa forma reducir de manera significativa la necesidad de suministros externos de energía [12], [13].

### 4.3. Sistema de combustión en Horno- Caldera.

El horno es el dispositivo donde tiene lugar la combustión, es decir, la reacción de oxidación mediante la cual el residuo es quemado para obtener calor. En dicha oxidación se descomponen los lodos, descomposición que en condiciones ideales se daría empleando la cantidad estequiométrica de oxígeno, pero que en la práctica se lleva a cabo con un exceso de este [14].

La distribución de tiempos de residencia es importante 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.

La eliminación de cenizas y escorias para evitar que la fracción no combustible se acumule en el interior del horno debe ser extraída continuamente, si el proceso es continuo o antes de cada operación.

En la caldera, la energía producida durante la combustión en el horno se transfiere a los gases de combustión que la alimentan. Por tanto, diremos que la caldera tiene dos funciones, por un lado, enfría los gases de combustión, que serán los que entran en el ciclón y por otro lado transferir el calor a ellos gases de combustión al agua, que saldrá de la caldera como vapor [14], [15].

Hay que tener en cuenta que, en este tipo de proceso, se debe inyectar una corriente en el horno con un agente reductor (normalmente amoníaco o urea) y reacciona con los óxidos de nitrógeno. Estas reacciones ocurren a temperaturas entre 850-1000°C. La reducción de NO<sub>x</sub> mediante un Proceso de Reducción No Catalítica Selectiva (RNCS) en más de un 60-80 %, requiere una mayor adición de agente reductor. Esto puede producir emisiones de amoníaco, que también se conocen como fuga de amoníaco [16], [26].

### 4.4. Aprovechamiento energético.

En este apartado se va a explicar el aprovechamiento energético basándonos en el Ciclo de Rankine de la Figura 4. Este ciclo comienza cuando el vapor sobrecalentado entra a la turbina a alta temperatura y presión (Punto 1). La turbina convierte la energía térmica en energía mecánica, la cual es convertida en electricidad en el generador. Mientras la turbina extrae energía del vapor, la presión y la temperatura de este vapor va disminuyendo. Si la expansión entra dentro de la curva de vapor saturado el vapor húmedo aparece y puede deteriorar los álabes de la turbina debido al impacto de las gotas de agua. El vapor cuando la presión de salida de la turbina es baja (Punto 2) es condensado en agua líquida (Punto 3) y presurizado por la bomba de alimentación (Punto 4). Añadiendo calor al agua, se genera vapor y es sobrecalentado en la caldera. Ahora, la condición antes de la turbina (Punto 1) es restablecida y el ciclo termodinámico es cerrado [15].

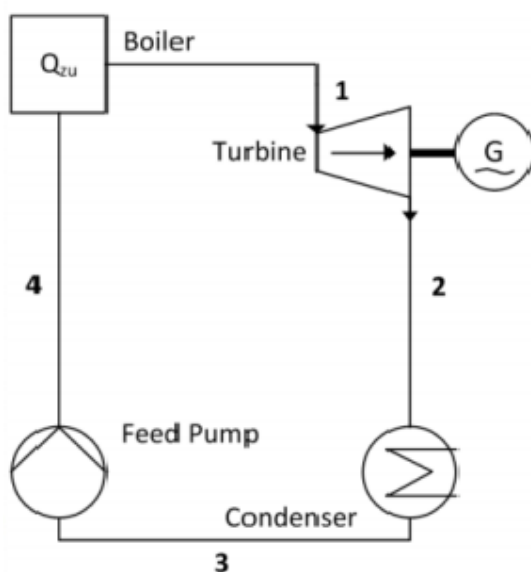


Figura 4. Esquema Ciclo de Rankine. Fuente: “Application of Organic Rankine Cycles (ORC)” [15]

#### 4.5. Tratamiento de gases.

A la hora de diseñar el sistema de tratamiento de gases de combustión, el objetivo principal ha sido minimizar el consumo de energía, siempre y cuando se cumpla el nivel de eficiencia ambiental según la normativa.

Con el tratamiento de gases se pretende reducir la cantidad de compuestos tóxicos y partículas para cumplir con la normativa vigente (RD 653/2003, de 30 de mayo, sobre incineración de residuos). Por tanto, el sistema de tratamiento de gases consistirá en la eliminación de gases ácidos y la separación de la ceniza volante del resto de la corriente para su posible reciclado [17].

Los procesos térmicos industriales provocan la generación de gases contaminados. Por ello, los elementos contaminantes que en un principio entran en la corriente de lodos procedentes de las EDAR, al aumentar la temperatura en el proceso, pasan a estado gaseoso. El inconveniente es que, si estos gases son emitidos sin tratamiento previo y una vez disminuida la temperatura del gas, llega un punto (punto de rocío) en el que esos elementos contaminantes vuelven a pasar a fase líquida, pudiendo alterar el medio circundante. Para ello, es imprescindible captarlos antes de su emisión a la atmósfera.

La cal y sus productos derivados son uno de los adsorbentes más adecuados para el tratamiento de gases. Su procedencia natural, fácil manejo, alta reactividad, riqueza, capacidad de abatimiento de contaminantes ácidos y la baja solubilidad de los productos resultantes tras las reacciones de neutralización, hacen que sea útil de aplicar en este tipo de procesos. Tanto la cal como sus derivados tienen otra función importante que es favorecer la protección de los filtros de mangas, presentes en la práctica totalidad de los sistemas de tratamiento de gases [18].

#### 4.6. Evacuación de gases.

Tras pasar por el tratamiento de limpieza diseñado para esta planta, se comprueba que la emisión de gases expulsados por la chimenea hacia la atmósfera cumple con la normativa propuesta por el RD 653/2003, de 30 de mayo, sobre incineración de residuos ([BOE-A-2013-10949-consolidado.pdf](#)). Además, se propondrán los sistemas de medida y control para cumplir con el registro de emisiones según la normativa. Los sistemas de control son los encargados de tomar muestras de las corrientes de salida y comprobar que se cumplen los valores establecidos por la normativa. Es la parte final del proceso y consiste en una serie de medidas tanto continuas (diarias y semihorarias) como discontinuas [17].

Por último, después de explicar en qué consiste cada una de las etapas y como se van a llevar a cabo para el diseño de la planta, se muestra en la figura 5 un diagrama de bloques simplificado de la planta propuesta, indicando cada una de las corrientes que pasan por ella.

| CORRIENTE | DESCRIPCIÓN  |
|-----------|--|
| 1         | Lodo húmedo (como se recibe). Humedad 16,5%  |
| 2         | Lodo húmedo (como se recibe). Humedad 16,5%  |
| 3         | Aire necesario para el secado  |
| 4         | Humedad retirada del lodo  |
| 5         | Lodo secado. Humedad 6,5%  |
| 6         | Cenizas de fondo e inquemados  |
| 7         | Aire necesario para la combustión  |
| 8         | Inyección de cal necesaria para la combustión  |
| 9         | Gases de combustión  |
| 10        | Agua en forma de vapor saturado  |
| 11        | Corriente acuosa   |
| 12        | Salida de los gases de combustión enfriados  |
| 13        | Inyección de NH <sub>3</sub> al ciclón para la eliminación de partículas   |
| 14        | Corriente de salida del ciclón después de la eliminación de ciertas partículas   |
| 15        | Partículas eliminadas con el ciclón de la corriente de alimentación  |
| 16        | Corriente de salida del filtro de mangas después de la eliminación de ciertas partículas   |
| 17        | Partículas eliminadas mediante el filtro de mangas de la corriente de alimentación   |
| 18        | Alimentación a la chimenea después de pasar por todos los sistemas de limpieza y por un intercambiador (para entrar a ella a la mayor temperatura posible) |
| 19        | Salida de los gases a la atmósfera con una concentración permitida por la normativa  |

Tabla 4. Descripción de las corrientes de la planta simplificada.

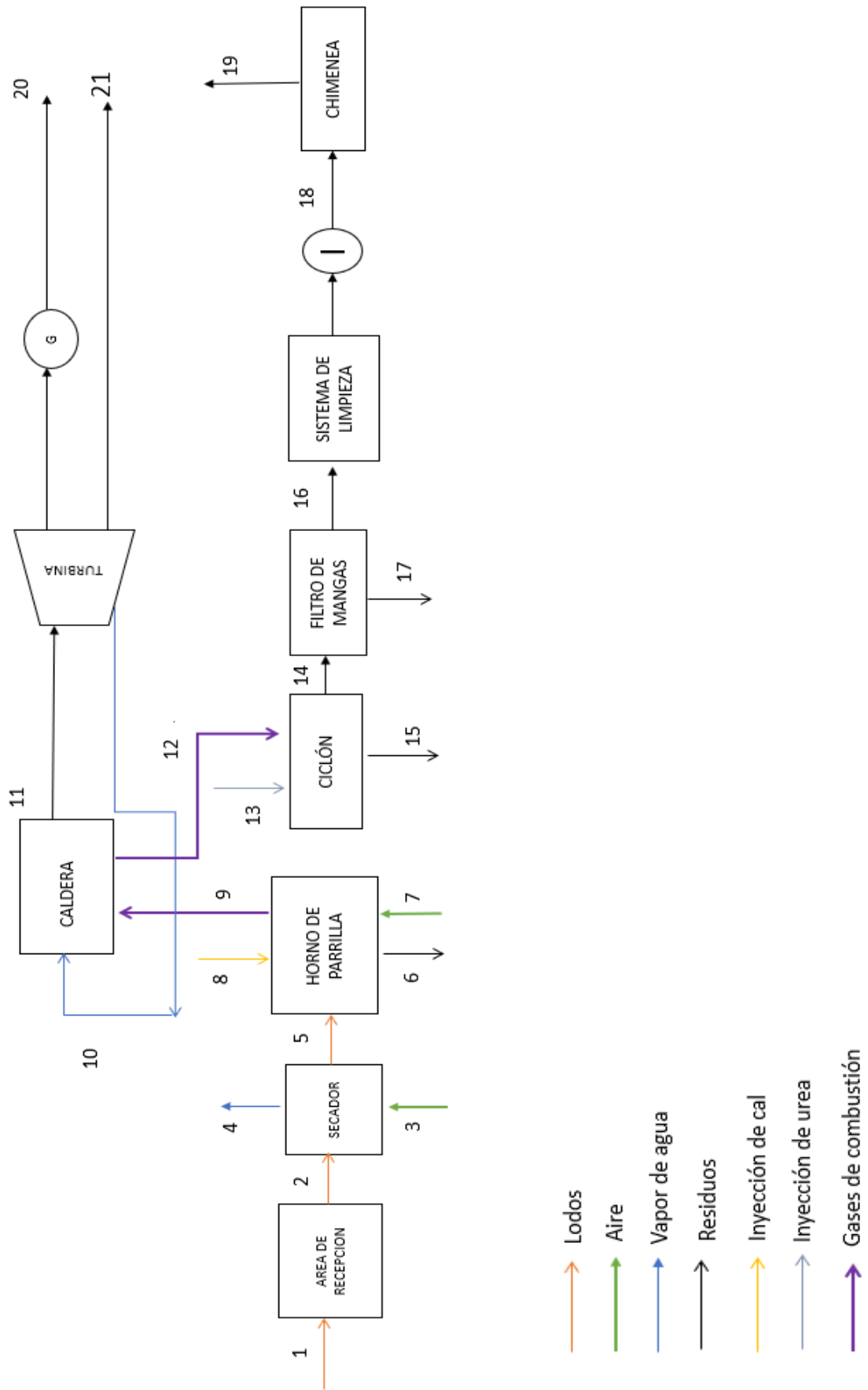


Figura 5. Diagrama de bloques simplificado de la planta.

# 5 ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS EQUIPOS

*“El genio se hace con 1% de talento y un 99% de trabajo”.*

*-Albert Einstein-*

**E**n este apartado se van a mencionar y explicar los equipos que han sido seleccionados para el diseño de la nuestra planta.

## 5.1. Secador de aire.

Después del estudio de diferentes técnicas de secado, finalmente se ha decidido la instalación de un secador de aire.

En primer lugar, el lodo que proviene de nuestra área de almacenamiento contiene un 16,5% de humedad y debe ser secado hasta conseguir un 6,5% de humedad. Se debe tener en cuenta que los lodos entran a una temperatura aproximada de 15°C.

Este proceso de secado opera en un rango de temperatura de aire seco comprendido entre 400-450 ° C.

Este secador consiste en una cabina aislada con un ventilador y una cinta transportadora por dónde van los lodos de forma granulométrica. Se introduce una corriente de aire caliente, de tal forma que consiga minimizar la humedad en el fango.

Finalmente, el fango seco se extrae en forma granular como combustible en el sistema de incineración de fangos.

## 5.2. Horno- Caldera.

En este caso, emplearemos un horno de parrillas, ya que es el más indicado para la incineración de lodos debido a su versatilidad y gran tamaño. Estos lodos son introducidos con un 6% de humedad aproximadamente. Se pretende operar a unos 850°C durante cierto tiempo, sin embargo, dicho exceso, ocasiona que el nitrógeno contenido tanto en el aire como en los residuos deje de actuar como inerte y reaccione contribuyendo a la formación de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y gases nocivos que deberán de ser tratados posteriormente. Para que la combustión sea correcta, los principales parámetros a los que se debe de prestar atención son: la temperatura del horno, la cantidad de aire introducido, y el tiempo de residencia de los gases y residuos dentro del horno. Por tanto, se va a estimar una temperatura de 650°C en el horno [18].

Según la normativa europea y española vigente de incineración de residuos establece una temperatura mínima en el horno de 850°C y un tiempo de permanencia mínimo de 2 segundos. Por lo tanto, las entradas de materias en el horno han de ser capaces de mantener como mínimo esta temperatura de combustión [19].

Por tanto, del total de lodos que alimenta al horno junto con un exceso de aire del 25%, dará lugar a los gases,

los cuales van a alimentar la caldera, y las escorias que están compuesta por un 3% de carbono inquemado, según normativa y el resto serán en torno a un 90% de las cenizas de la alimentación.

Estas escorias deben cumplir la normativa de emisiones de residuos ya que serán extraídas del horno casi por completo, menos un porcentaje minoritario que posiblemente no se haya quemado o en polvo salga en la corriente de los gases.

En el diseño de la caldera se debe tener en cuenta las características de las corrientes de gases, potenciales de corrosión, erosión y ensuciamiento, además de las características del vapor.

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.

### **5.3. Limpieza de metales pesados.**

Para seguir, nos encontramos con la quinta etapa de tratamiento de gases, donde se incluyen los equipos que tratan la limpieza de sólidos y metales pesados.

#### **5.3.1. Ciclón.**

Los ciclones constituyen uno de los medios menos costosos de recolección de polvo, tanto desde el punto de vista de operación como de la inversión.

Presentan eficiencias mayores que la cámara de sedimentación gravitacional, y eficiencias menores que los filtros de teflas, lavadores y precipitadores electrostáticos. La fuerza centrífuga generada por los giros del gas dentro del ciclón puede ser mucho mayor que la fuerza gravitacional, ya que la fuerza centrífuga varía en magnitud dependiendo de la velocidad de giro del gas y del radio de giro.

El ciclón, va a ser diseñado con un 95% de eficiencia, en él se van a eliminar las partículas mayores procedentes de la caldera.

El funcionamiento del ciclón consiste en remover el material particulado de la corriente gaseosa, basándose en el principio de impactación inercial, generado por la fuerza centrífuga, que hace que las partículas mayores se desplacen hacia las paredes del ciclón. Así, las partículas sólidas descienden decantando en un depósito [20].

Los ciclones son adecuados para separar partículas con diámetros mayores de 5  $\mu\text{m}$ , aunque partículas muchas más pequeñas también pueden ser separadas en ciertos casos.

Estos, no alcanzan los niveles de emisión exigidos hoy en día, por tanto, sirve como etapa previa a la eliminación o tratamiento de la corriente de gases.

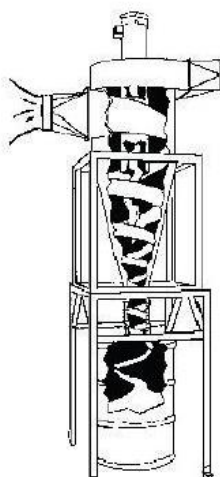


Figura 6. Esquema del mecanismo de un ciclón. Fuente: Revista de Ingeniería de la Universidad de Medellín. [21]

### 5.3.2. Filtro de Manga.

El funcionamiento de un filtro de mangas consiste en uno o más compartimientos aislados que contienen filas de mangas de tejido. El flujo de gas viaja en dirección perpendicular a la superficie del medio filtrante, por lo que las partículas son retenidas en el mismo, y solo atraviesa la tela el aire que es liberado a la atmósfera. El filtro opera cíclicamente en el que se alternan períodos relativamente largos de filtración y cortos de limpieza. Durante la limpieza el polvo que ha aumentado en cantidad. Los filtros de tela retienen partículas de tamaños que van desde micras a varias micras de diámetro a eficiencias generalmente superiores al 99%.

La torta retenida en el tejido es la principal responsable de tan alta eficiencia, ya que es una barrera con poros que atrapa partículas entre sí. La temperatura máxima de operación está determinada por el tipo de tela y se encuentra alrededor de 260 ° C y la mayoría de la energía requerida por el sistema es utilizada para vencer la caída de presión ocasionada en las mangas. Los valores típicos de caída de presión se encuentran en el rango de aproximadamente 1,25 a 5 kPa [21], [22].

Los principales factores que afectan a la filtración son: la fuerza impulsora aplicada, la resistencia de la torta a la filtración, la temperatura de suspensión, el tamaño de las partículas, la concentración de sólidos en suspensión y la naturaleza del medio filtrante [23].



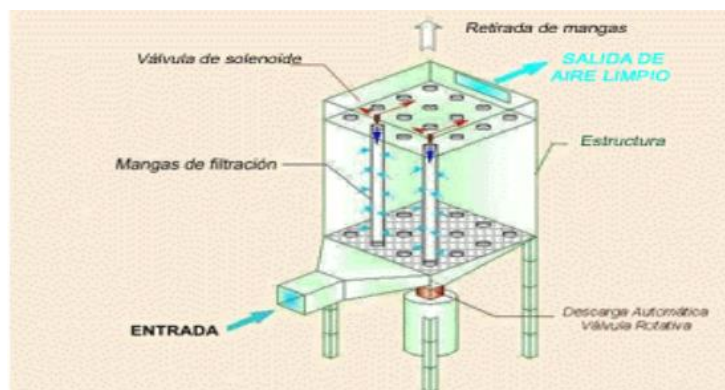


Figura 7. Esquema de la operación de un filtro de mangas. Fuente: Díaz Y. y González E, 2016 [23].

### 5.3.3. Otros sistemas de limpieza.

Tanto el Cadmio como el Mercurio son elementos muy volátiles y difíciles de eliminar con el ciclón o el filtro de mangas, por tanto, van a pasar con la corriente de gases de combustión.

El valor límite del Mercurio según la normativa es de  $0,05 \text{ mg/m}^3$  y mediante el sistema de limpieza de una eficiencia de eliminación de aproximadamente un 96% [17].

La corriente de gases de combustión que sale del sistema de limpieza debe pasar por un intercambiador de calor, el cual calienta esta corriente y llega a la chimenea.

Conforme la corriente va pasando por los equipos de reducción de partículas, se debe tener en cuenta que deben cumplir la normativa de emisión.

## 5.4. Chimenea.

Para finalizar, en la última etapa de tratamiento de gases se va a incluir como equipo la chimenea, por la cual van a salir los gases finales a la atmósfera y éstos deben cumplir la correspondiente normativa.

Como el filtro de mangas tiene un rendimiento del 98%, algunas partículas van a pasar con la corriente de gases, por ello se comprueba que la emisión a la atmósfera cumpla correctamente el Real Decreto. Para ello se dispondrá de los sistemas de medida y control necesarios [17].

# 6 MEMORIA DE CÁLCULOS

*“Si la oportunidad no llama, construye una puerta”.*

*-Milton Berle-*

**E**sta memoria de cálculo incluye el desarrollo de los cálculos para realizar el balance de materia y energía de este proceso de incineración de lodos.

Como se ha comentado anteriormente, esta instalación está diseñada para una alimentación de 70000 toneladas al año de lodos procedentes de una depuradora de lodos, que es equivalente a 7990,87 kg a la hora. Operando unas 8000 horas al año.

La disponibilidad de la planta se ha obtenido sabiendo que un año tiene 8760 horas, teniendo en cuenta los datos del fabricante de los equipos y según el funcionamiento de la empresa Emasesa, se estima que la planta va a operar 8000 horas.

Los cálculos de las corrientes se han realizado con Microsoft Excel en la mayor parte.

## 6.1. Balance de Materia.

Los cálculos del balance de materia se van a dividir por zonas, hasta determinar las diferentes composiciones de las corrientes de la planta.

En primer lugar, hay que tener en cuenta la humedad con la que llega el lodo a nuestra planta y con la que va a entrar en el proceso de combustión. También hay que tener en cuenta el aire necesario para la combustión, así como la corriente de salida de gases.

### 6.1.1 Secador de aire.

Para llevar a cabo estos cálculos se parte de una alimentación de 7990,87 kg/h, Emasesa nos proporciona el dato de la humedad del lodo correspondiente a un 16,5 %, eso quiere decir que habrá 6672,37 kg/h de lodos y 1318,49 kg/h de H<sub>2</sub>O.

Se va a suponer que el secador de aire va a disminuir la humedad hasta un 6,5%, es una humedad considerable para la entrada al horno.

En la siguiente tabla, se determinan los datos para definir las corrientes de entrada y salida del secador de aire.

|                              | CORRIENTE 2 | CORRIENTE | CORRIENTE 4 | CORRIENTE 5 |
|------------------------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| <b>LODOS (kg/h)</b>          | 6672,37     | -         | -           | 7136,22     |
| <b>H<sub>2</sub>O (kg/h)</b> | 1318,49     | -         | 854,64      | 463,85      |
| <b>AIRE (kg/h)</b>           | -           | 9219,53   | -           | -           |
| <b>TEMPERATURA (°C)</b>      | 15          | 450       | 100         | 120         |

Tabla 5. Corrientes del secador de aire.

Una vez calculado los lodos y el agua de la corriente de salida del secador, así como el H<sub>2</sub>O evaporado, necesitaremos calcular el calor que se necesita para ello, ya que se necesita saber la masa de aire de entrada al secador.

Por tanto, se sustituyen los datos en la *ecuación (1)*, y se estima el calor a aportar por el secador,  $Q_{\text{secador}}$ . Teniendo en cuenta que los lodos entran a 15°C y salen a 120°C, se va a obtener un resultado de 4950,72 MJ.

Además, cabe destacar que el valor de  $\lambda$  corresponde al calor latente de evaporación del agua, concierne a 2257 kJ [8].

$$Q_{\text{sec}}(MJ) = m_{l1}Cp_{\text{lodos}}(T_{L2} - T_{L1}) + m_{H1}Cp_{\text{cw}}(T_{\text{cwevap}} - T_{L1}) + m_{H2}Cp_{\text{vapor}}(T_{L2} - T_{L1}) + m_{H2O\text{evap}}$$

[Ec.1]

A continuación, al sustituir los datos en la *ecuación (2)*, y suponiendo un incremento de temperatura  $\Delta T$  de 450°C, se determina una masa de aire de 9.219,53 kg/h.

$$Q_{\text{secador}}(MJ) = m_{\text{aire}}Cp_{\text{aire}}(\Delta T)$$

[Ec.2]

Una vez calculados todos los caudales de las corrientes, en la siguiente figura se muestra el diagrama de las corrientes de entrada y salida del secador ya definidas.

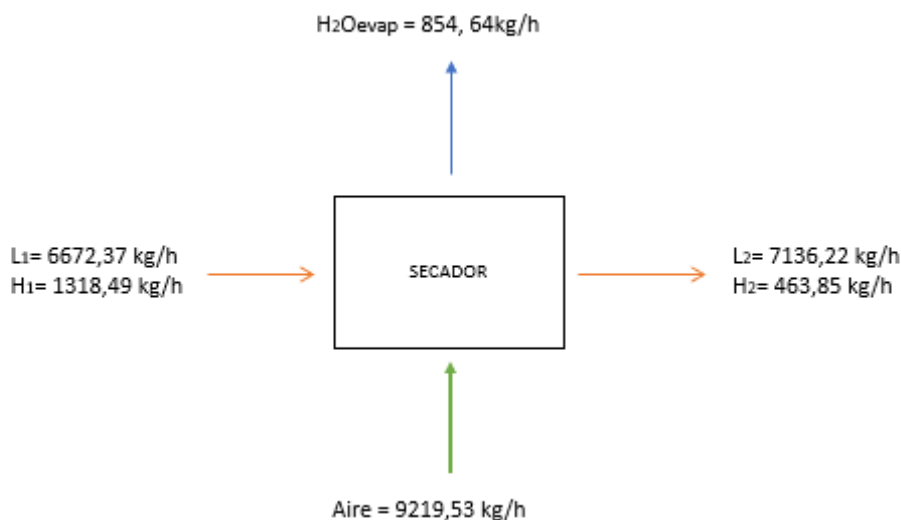


Figura 8. Diagrama de entrada- salida del secador de lodos

### 6.1.2 Aire necesario para la combustión.

En este apartado se va a calcular el aire necesario para la combustión de lodos. Este aire será calculado a partir de de la cantidad de oxígeno que aporten las siguientes reacciones:

- (1)  $C + O_2 \rightarrow CO_2$
- (2)  $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$
- (3)  $S + O_2 \rightarrow SO_2$

Para calcular el aire estequiométrico sumamos el  $O_2$  de todas las reacciones de combustión completas, teniendo en cuenta que todo el C reacciona como  $CO_2$  sumando un total en kmol de 275,5 kmol de  $O_2$  estequiométrico, que aplicando la ecuación (3) se obtiene el aire estequimétrico necesario.

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

[Ec.3]

Teniendo en cuenta que el peso molecular del aire son 28,98 kg/ kmol, el aire teórico correspondiente es 38.043,38 kg/h.

Los hornos permiten trabajar con un exceso de aire con un ratio entre 1,2- 1,5, según Xavier Elias (2012) por ello, en este caso se ha elegido un valor medio de un 25% de exceso de aire, efectivamente, el aire real que entra en el horno por la corriente 7 se corresponde a un valor numérico de 47.554,82 kg/h [24].

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

(Ec.4)

### 6.1.3 Corriente de oxidados.

Para el cálculo de esta corriente de oxidados que salen del sistema de combustión, se tiene en cuenta que la cantidad típica de cenizas volantes, respecto a la total se mueve entre un 9-10%, se ha determinado un valor de 10% de cenizas volantes del total de cenizas obtenidas a 850°C.

Esto quiere decir, que se determina que un 90% de las cenizas que contienen los lodos salen por la corriente 6 como oxidados y el resto serán cenizas volátiles que pasarán con la corriente de los gases de salida del sistema de combustión.

Por otro lado, se ha de tener en cuenta, que no todo el carbono reacciona, sino que parte de este carbono conocido como carbono inquemado sale con las cenizas en la corriente de oxidados. La cantidad de carbono inquemado se ha obtenido como una media de las composiciones de varios estudios sobre cenizas de plantas incineradoras, por tanto, se supone un máximo según normativa de 3% y 97% correspondiente a las cenizas [18], [25].

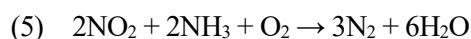
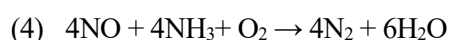
Numéricamente se calcula que el 90% de las cenizas que entran corresponde a  $1554,56 \cdot 0,9 = 1399,104$  (kg/ h).

Esto quiere decir que los 1399,104 kg/ h de cenizas, constituyen el 97% de la corriente 6 de oxidados, es decir, 1357, 15 kg/ h de cenizas y 41, 97 kg de Carbono inquemado.

### 6.1.4 Corriente entrada de amoníaco.

Como se ha comentado anteriormente, en el proceso de combustión se necesita inyectar en el horno una corriente de un agente reductor, en nuestro caso se ha decidido utilizar amoníaco (NH<sub>3</sub>).

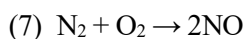
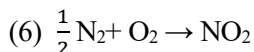
En este apartado se han de determinar las cantidades necesarias para el abatimiento de los NO<sub>x</sub>, se va a calcular el caudal de amoníaco que se ha de inyectar según las siguientes reacciones, y los resultados se indican en la tabla 4.



Para calcular la cantidad de amoníaco que se va a inyectar en la corriente 8 se debe tener en cuenta que de todo el N que entra con los lodos, según J. Werther y T. Ogada et. al (1999), el 85% va a salir en la corriente de gases

como  $N_2$  y del 15% restante que va a reaccionar como  $NO_x$ . Partiendo de este dato final se va a suponer una estimación de que  $\frac{1}{2}$  de ese 15% va a reaccionar como  $NO$  y  $\frac{1}{2}$  reaccionará como  $NO_2$  [26].

Partiendo de ese 15% de  $NO_x$ , que numéricamente son 53,845 kg/h, y aplicado estequiometría a las reacciones planteadas a continuación (6), (7), se va a determinar los valores numéricos del resto de compuestos, especificando así la cantidad de amoníaco a introducir en la corriente 8 mediante las ecuaciones (4) y (5).



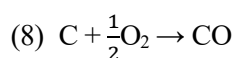
| COMPONENTE                        | Peso Molecular | Kg/h    |
|-----------------------------------|----------------|---------|
| <b><math>N_2</math> Salida</b>    | 28             | 305,124 |
| <b><math>N_2</math> reacciona</b> | 28             | 53,845  |
| <b><math>NO_2</math></b>          | 46             | 88,45   |
| <b><math>NO</math></b>            | 30             | 57,69   |
| <b><math>NH_3</math></b>          | 17             | 65,38   |

Tabla 4. Datos de nitrógeno para definir la cantidad de amoníaco a introducir.

### 6.1.5 Cálculo de los gases de combustión.

En este apartado se va a especificar la corriente de salida del sistema de combustión, que corresponde a la corriente 9 en nuestro diagrama simplificado de la planta.

A los productos formados en las reacciones de combustión anteriores se le debe añadir la del monóxido de carbono que no se ha tenido en cuenta para el cálculo del aire estequimétrico, mediante la reacción:



En primer lugar, se va a calcular la cantidad de carbono que reacciona para saber qué cantidad va a reaccionar como  $CO_2$  y que cantidad como  $CO$ . Para ello hay que tener en cuenta el carbono inquemado que habrá que restárselo al carbono inicial, es decir, reacciona 2173,25 kg/h.

Se va a suponer, que de este valor de Carbono la mayor parte va a reaccionar como  $CO_2$  y minoritariamente como  $CO$ , ya que éste último es un gas tóxico que resulta de la combustión incompleta del Carbono, en los hornos puede actuar como agente reductor, pero si se desprende a la atmósfera es muy contaminante. Por ello, se va a determinar que el 90% reacciona como  $CO_2$  y el 10% como  $CO$  [24], [25].

En segundo lugar, para el cálculo de la salida de  $SO_2$ , es simplemente lo que se forma estequímicamente según la reacción (3).

Para el cálculo de la corriente de salida del  $N_2$  hay que tener en cuenta por un lado el procedente del aire, que

son 37.568,31 kg/h, por otro lado, como se ha comentado en apartados anteriores, según J. Werther y T. Ogada et. al (1999), del Nitrógeno que entra en la corriente de alimentación el 85-90% va a salir como N<sub>2</sub>, para este diseño de la planta se va a determinar un 85% [26].

Por último, con relación a la salida del sistema de combustión del Nitrógeno hay que considerar el N<sub>2</sub> que se forma debido a las reacciones del amoniaco (4) y (5).

Asimismo, se debe calcular la cantidad de H<sub>2</sub>O que sale del sistema de combustión, y para ello hay que tener en cuenta el agua que se forma por la combustión del H<sub>2</sub> según la reacción (2) que numéricamente son 3159,9 kg/h, así como el agua que proviene de la humedad que contiene aún la corriente de alimentación de los lodos y por último, se debe tener en cuenta el agua que se forma según las reacciones (4) y (5) de la inyección del amoniaco.

Finalmente, hay que calcular la cantidad de O<sub>2</sub> teniendo en cuenta el introducido y el gastado para calcular la cantidad de oxígeno a la salida. En la *tabla 5* se especifica el oxígeno formado en cada reacción.

|  |                                | kg/h de O <sub>2</sub> |
|--|--------------------------------|------------------------|
| $C + O_2 \rightarrow CO_2$               | Formación de CO <sub>2</sub>   | 5215,79                |
| $C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$     | Formación de CO                | 289,76                 |
| $H + O_2 \rightarrow H_2O$               | H <sub>2</sub> O               | 1404,4                 |
| $S + O_2 \rightarrow SO_2$               | S <sub>2</sub> O               | 102,09                 |
| $N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$              | NO                             | 30,76                  |
| $\frac{1}{2} N_2 + O_2 \rightarrow NO_2$ | NO <sub>2</sub>                | 61,53                  |
| <b>Reacciones (4) y (5)</b>              | Abatimiento de NH <sub>3</sub> | 46,144                 |
| <b>Suma</b>                              |                                | <b>7150,77</b>         |

Tabla 5. Caudales de Oxígeno formado en cada reacción.

Con la siguiente *ecuación (5)* se va a calcular el oxígeno real introducido mediante la cantidad de aire introducido en la corriente 7.

$$Oxigeno\ real \left( \frac{kg}{h} \right) = Aire\ real\ necesario \left( \frac{kg}{h} \right) \cdot (0,21) = 9986,51 \frac{kg}{h}$$

[Ec. 5]

Por tanto, para calcular el O<sub>2</sub> que sale en la corriente 9, habrá que restarle a este oxígeno real la suma de oxígeno gastado mediante todas las reacciones que se llevan a cabo en el proceso, es decir, 2835,74 kg/h.

Hasta ahora se ha detallado el proceso de cálculo de cada uno de los compuestos a la salida del sistema de combustión, por tanto, se va a recoger cada uno de los caudales de salida en la *tabla 6* que se muestra a continuación:

| PRODUCTOS        | PESO MOLECULAR (Kg) | CAUDAL DE SALIDA (Kg/h) |
|------------------|---------------------|-------------------------|
| H <sub>2</sub> O | 18                  | 3779,5                  |
| CO <sub>2</sub>  | 44                  | 7171,7                  |
| CO               | 28                  | 507,09                  |
| SO <sub>2</sub>  | 64                  | 204,18                  |
| N <sub>2</sub>   | 28                  | 38008,03                |
| O <sub>2</sub>   | 32                  | 2835,74                 |
| NO               | 30                  | 57,69                   |
| NO <sub>2</sub>  | 46                  | 88,45                   |
| Partículas       | -                   | 155,456                 |

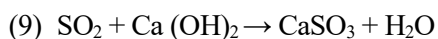
Tabla 6. Composición de gases de combustión a la salida del horno.

Cabe recordar que las partículas que constituyen la corriente de salida de los gases, es un 10% aproximadamente de las cenizas que entran en la corriente de alimentación de la planta.

### 6.1.6 Tratamiento de limpieza de metales pesados mediante el ciclón.

El ciclón es el primer equipo del sistema de limpieza de la planta, tiene un rendimiento del 95% y gracias a él se van a eliminar gran cantidad de metales pesados sobretodo los de menor volatilidad y más oxidables. Esto quiere decir numéricamente, que el caudal de sólidos que va a eliminar es de 147,68 kg/h y las partículas que no se eliminan y pasarán al filtro de mangas son 7,776 kg/h.

El ciclón necesita la inyección de una corriente de cal hidratada para la eliminación de compuestos, según la siguiente reacción química:



Como sabemos la cantidad de SO<sub>2</sub> que sale con la corriente de gases, se va a partir de ese dato para calcular la cantidad de cal que se va a necesitar inyectar en el ciclón, que corresponde con la corriente 13 del diagrama simplificado de la planta.

No se va a considerar que todo el SO<sub>2</sub> reacciona porque no se obtendría a la salida, sino que se va a considerar un rendimiento de la reacción del 96%, ya que por normativa se tiene que conseguir un % de desulfuración del 90-98%. Por otro lado, se tendría el rendimiento del ciclón y así a la salida del ciclón se va a obtener un porcentaje pequeño de SO<sub>2</sub>.



| COMPUESTOS          | SO <sub>2</sub> | Ca (OH) <sub>2</sub> | CaSO <sub>3</sub> | H <sub>2</sub> O |
|---------------------|-----------------|----------------------|-------------------|------------------|
| kg/h que reacciona  | 196,013         | 232,76               | 367,52            | 55,13            |
| Peso Molecular (kg) | 64              | 76                   | 120               | 18               |

Tabla 7. Compuestos y cantidad que reacciona al inyectar cal

En la *tabla 9*, se muestra la cantidad que reacciona de cada compuesto, dando lugar a H<sub>2</sub>O que va a salir por la corriente 14 hacia el filtro de mangas y CaSO<sub>3</sub> que separará el 95% y el resto en la corriente 14.

Se ha determinado la cantidad de cal necesaria estequiométricamente según la reacción, pero esa no es la cantidad real de cal que entra, para calcular la cantidad de cal se supone un exceso del 50%, con lo cual la corriente 13 se definiría según la siguiente fórmula:

$$Cal\ real\ \left(\frac{kg}{h}\right) = 1,5 \cdot Cal\ estequimetrica = 349,14 \frac{kg}{h} Ca\ (OH)_2$$

[Ec. 5]

Como lo que se introduce de cal realmente en la corriente 13 es mayor que lo que se necesita, se supone un rendimiento del 100% en el ciclón, por ello, todo lo que sobra sale del ciclón en la fracción de partículas sólidas.

En el siguiente diagrama se muestra como quedan definidas las corrientes de entrada y salida del ciclón:

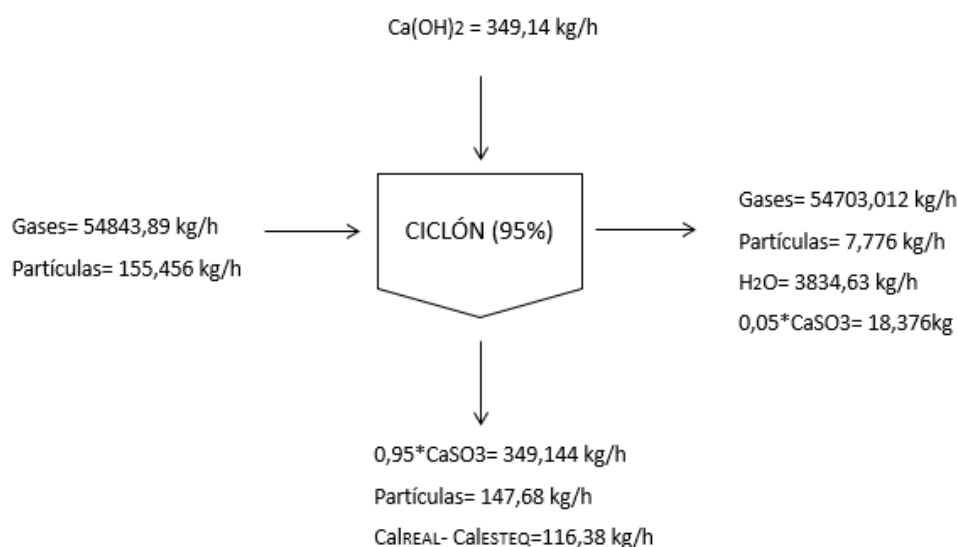


Figura 9. Diagrama de especificación de corrientes en el ciclón.

### 6.1.7 Tratamiento de limpieza de metales pesados mediante el filtro de mangas.

Como se puede observar en las corrientes de salida, los gases ácidos y partículas sólidas se quedan reducidas al 95%, sin embargo, esto no es del todo cierto, ya que hay partículas muy volátiles además de contaminantes que salen del ciclón hacia el filtro de mangas.

El filtro de mangas es un tratamiento de eliminación de contaminantes con un rendimiento del 98%, ya que es inviable eliminar estas partículas al 100%, pero sí reducirse lo máximo posible para que al salir a la atmósfera no supere lo máximo permitido por la normativa.

Hay que tener en cuenta que en estos sistemas de limpieza no se elimina agua, por lo tanto, la corriente de agua es la misma que sale con los gases de combustión.

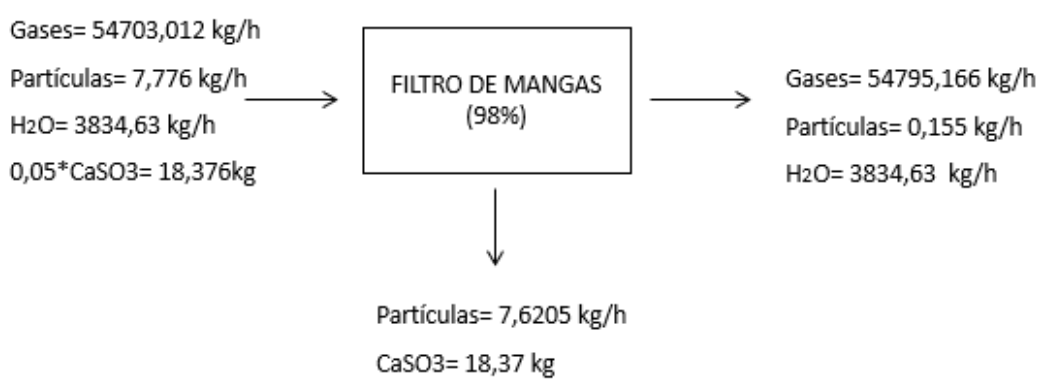


Figura 10. Diagrama de especificación de corrientes en filtro de mangas.

Después de realizarse el tratamiento de limpieza mediante el ciclón, el filtro de mangas y otros con el fin de que los gases de salida de la planta cumplan la normativa de contaminación atmosférica, se recogen en la *tabla 8* la composición de salida en Nm<sup>3</sup> de los gases del sistema de combustión, que corresponde a la corriente 19.

|                       | kg/h     | kmol/h  | Peso Molecular | Nm <sup>3</sup> |
|-----------------------|----------|---------|----------------|-----------------|
| <b>H<sub>2</sub>O</b> | 3834,63  | 213,33  | 18             | 4771,98         |
| <b>CO<sub>2</sub></b> | 7171,70  | 162,99  | 44             | 3651,05         |
| <b>CO</b>             | 507,09   | 18,11   | 28             | 405,67          |
| <b>SO<sub>2</sub></b> | 8,17     | 0,13    | 64             | 2,86            |
| <b>N<sub>2</sub></b>  | 38008,03 | 1357,43 | 28             | 30406,42        |
| <b>O<sub>2</sub></b>  | 2835,74  | 88,62   | 32             | 1985,02         |
| <b>NO</b>             | 57,69    | 1,92    | 30             | 43,07           |
| <b>NO<sub>2</sub></b> | 88,45    | 1,92    | 46             | 43,07           |

Tabla 8. Composición de salida de los gases de la chimenea.

### 6.1.8 Residuos sólidos.

La corriente de lodos de alimentación contiene un porcentaje de metales pesados, que corresponden a los señalados en la *tabla 9*.

La empresa Emasesa ha proporcionado los datos en mg/kg de los metales pesados, y se han pasado a kg/h para poder trabajar más fácilmente.

| COMPONENTE      | VALOR MEDIO (kg/h) |
|-----------------|--------------------|
| <b>Hierro</b>   | 254,01             |
| <b>Aluminio</b> | 100,05             |
| <b>Níquel</b>   | 0,16               |
| <b>Cobre</b>    | 1,44               |
| <b>Cromo</b>    | 0,39               |
| <b>Cadmio</b>   | 0,01               |
| <b>Zinc</b>     | 5,59               |
| <b>Plomo</b>    | 0,50               |
| <b>Mercurio</b> | 0,01               |

Tabla 9. Composición de los metales pesados que componen el lodo. Fuente: Emasesa.

La corriente de lodos que alimenta nuestra planta de incineración contiene una mezcla de metales pesados que requieren un estudio más profundo sobre el impacto ambiental que provoca. Estas emisiones se pueden producir tanto en fase gas como en fase sólida. La Directiva 2004/107/ CE regula las emisiones de metales pesados a la atmósfera y la Directiva 2000/76/CE establece los valores límites en la incineración.

Cuando la corriente de lodos sale del sistema de combustión del horno- caldera, esos metales pesados según su facilidad de volatilización y temperatura van a tener mayor facilidad para eliminarse, o van a tener que ser tratados varias veces hasta conseguir eliminarlos. Todo esto se hace para que la cantidad que salga a la atmosfera cumpla con las condiciones de toxicidad de la normativa.

A continuación, se van a describir cada uno de los metales pesados que compone el lodo y se impondrán los porcentajes que se han utilizado para el proceso de limpieza en el diseño de nuestra planta según una serie de artículos:

- **Hierro.**

El Hierro a altas temperaturas es un elemento que se oxida fácilmente, gran cantidad se va a oxidar en forma de ferrita saliendo por la corriente de escorias. El resto, en torno a un 10% va a pasar al ciclón donde condensará y será tratado casi completamente [27], [28].

- **Aluminio y Cobre.**

Tanto el Aluminio como el Cobre son elementos poco volátiles, por lo tanto, tienen someterse a elevadas temperaturas para que pasen a la corriente de gases.

El Aluminio se considera que tan solo en torno a un 13% se volatiliza, el resto será eliminado con las escorias.

Sin embargo, el Cobre es aún menos volátil ya que se va a eliminar por la corriente de oxidados aproximadamente un 93% [28], [31].

- **Níquel.**

El Níquel es un elemento bastante abundante en la corteza terrestre, pero muy poco abundante en la corriente de lodos, ya que requiere un gran periodo de tiempo para ser eliminado al aire o a aguas residuales.

Se va a considerar que en torno al 14% de la corriente de entrada al horno va a salir como oxidados, y el resto va a pasar al ciclón mediante la corriente de gases. Siendo esta corriente prácticamente limpia de este elemento gracias al ciclón [29].

- **Cromo.**

El Cromo es un elemento de transición duro, frágil y con elevado punto de ebullición. Con lo cual, su volatilidad es bastante baja y por ello se determina en torno a un 3% de la corriente de entrada al horno la que va a salir en la corriente de gases, el resto se irá con las cenizas.

En la UE se reporta un promedio de cromo en el aire en áreas urbanas 4 - 70 ng/m<sup>3</sup>, ya que en lo referido a la salud humana es un metal bastante tóxico [30].

- **Cadmio.**

El cadmio a altas temperaturas es un elemento muy volátil, pero con la temperatura del horno no es suficientemente alta para que pase completamente como gas, por tanto, se eliminará en él un 15% y el 85% restante va a salir por la corriente de gases [28], [31].

El ciclón va a eliminar en torno a un 75% ya que condensa, pero el resto seguirá en forma de gas pasando por el filtro de mangas para reducir completamente las emisiones.

- **Zinc.**

El Zinc es un elemento bastante tóxico, pues el vapor de este elemento se puede condensar reoxidándose. Este elemento es muy pulverulento y corrosivo, al someterse a altas temperaturas gran parte sale junto a los gases, y un 60% por la corriente de oxidados [31].

En general, los niveles de cinc en el aire son relativamente bajos y no fluctúan mucho. Los niveles promedio de cinc en el aire en los Estados Unidos son menores de 1 µg/m<sup>3</sup>, pero varían entre 0.1 y 1.7 µg/m<sup>3</sup> cerca de áreas urbanas. El aire cerca de áreas industriales puede tener niveles de cinc más altos. La concentración promedio de

cinc durante un período de un año en un área cerca de una fuente industrial fue de  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  [34].

Este elemento no condensa fácilmente, con lo que del 40% inicial gran parte no será eliminado por el ciclón y tendrá que ser tratado por el Filtro de mangas.

- **Plomo.**

El plomo es un elemento que puede formar aleaciones con muchos metales y tienen importancia industrial. Estos compuestos formados con Plomo son extremadamente tóxicos y debe ser manejado con cuidado y ocurren de forma natural en el ambiente [31].

De esta forma, el contenido en Plomo en nuestra corriente de lodos se va a eliminar para que cumpla la normativa de emisión a la atmósfera. Teniendo en cuenta que a altas temperaturas en el horno se va a eliminar en torno a un 40%, el 60% restante pasará al ciclón, donde al condensar éste eliminará un 70% y el 30% continuará con la corriente de gas hacia el filtro de mangas, donde será eliminado.

- **Mercurio.**

El mercurio es uno de los elementos con mayor volatilidad, esto quiere decir que al calentarse en el horno a elevadas temperaturas el 90% va a salir con la corriente gaseosa, no siendo suficiente para reducir las cantidades de emisión tan sólo el ciclón, será necesario el filtro de mangas.

Los supuestos porcentajes recogidos en el presente apartado para las instalaciones de combustión existente se aplican debido a una serie de artículos, y por ello se proponen esos datos aproximados para cada metal [32], [33].

Según el Real Decreto 815/2013, los valores límites de emisión totales para metales pesados expresados como valores medios se determinan tanto para el Cadmio como para el Mercurio de una emisión permitida máxima de  $0,05 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  cada uno. Y el Plomo, Cobre, Níquel y Cromo un total de  $0,5 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  [17].

Teniendo en cuenta todos los balances especificados en la sección 6.1. en la *tabla 11*, que se encuentra en el Anexo I, se resumen los caudales de cada corriente del proceso.

## 6.2. Balance de Energía.

En este apartado se van a desarrollar los cálculos llevados a cabo para estimar la cantidad de energía que va a producir nuestra planta de incineración de lodos.

En primer lugar, se va a recordar la cantidad de energía que necesita el secador de aire para reducir la cantidad de humedad de los lodos que alimentan la planta, como se calculó en el apartado anterior:

$$Q_{sec}(MJ) = m_{l1}Cp_{lodos}(T_{L2} - T_{L1}) + m_{H1}Cp_{cw}(T_{cwevap} - T_{L1}) + m_{H2}Cp_{vapor}(T_{L2} - T_{L1}) + m_{H2Oevap}\lambda$$

$$Q_{\text{sec}} = 4950,72 \text{ MJ}$$

En segundo lugar, se ha de calcular la cantidad de energía que desprende el sistema de combustión con la siguiente ecuación, siendo  $Q$  la energía a calcular:

$$Q_{CC} + Q_{IN} = Q_{OUT} + Q_{PERD} + Q$$

[Ec.6]

Donde:

- $Q_{CC}$ : Calor de combustión
- $Q_{IN}$ : Calor introducido por la corriente de lodos y agua
- $Q_{OUT}$ : Calor desprendido por la corriente de gases y cenizas.
- $Q_{PERD}$ : Perdidas de calor que desprende el sistema.
- $Q$ : Energía total que desprende el sistema

Para el cálculo de la energía total que desprende el sistema es necesario el cálculo de cada uno de los calores por separado, teniendo en cuenta el diagrama que se representa a continuación en la figura 11.

Para el cálculo de estas energías de forma individual podría calcularse observando la cantidad aportada por cada compuesto y caracterizando la energía de los gases de combustión pero este método es largo, por ello se va a realizar de otra forma mucho más sencilla de obtener estos valores, que consiste en obtener una media de los poderes caloríficos específicos de cada compuesto, determinado por una serie de artículos de Science of The Total Environment [9].

Se debe tener en cuenta las temperaturas de entrada y salida que están definidas en todas las corrientes, determinando la de salida de los gases a 185°C debido a las siguientes recomendaciones:

- A niveles por debajo de 180 °C existe mayor riesgo de corrosión, al encontrarse esta temperatura cerca del punto de rocío de algunos gases ácidos.
- El rango de temperatura de salida aconsejado por el fabricante esta entre 150 y 200 °C

Para la salida de las cenizas se estima una temperatura de 650°C, ya que es la temperatura usada para estimar las pérdidas. Sin embargo, la combustión se lleva a cabo a 900°C, ya que es la máxima temperatura a la que se debe llevar el horno para que se lleve a cabo el proceso de combustión.

Por otra parte, para la entrada de los lodos se estima 15°C debido a una media estadística por meses de los últimos años en Sevilla [34].

Para finalizar, la diferencia de temperatura en el aire será de aproximadamente 450°C, debido a que entra precalentado en torno a 80°C.

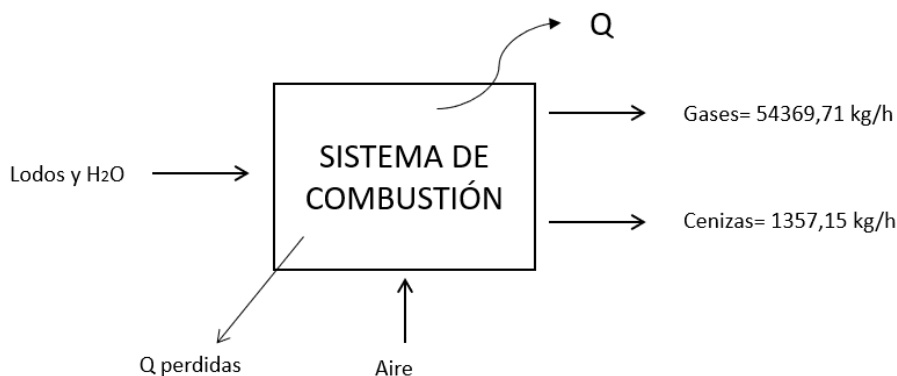


Figura 11. Diagrama del proceso de combustión.

A continuación, una vez definido todos los datos de temperatura y poderes caloríficos, se detallan los cálculos de cada uno de los calores que influyen en el sistema de combustión.

Se debe tener en cuenta que en cada una de estas ecuaciones la  $T_{ref} = 25^{\circ}\text{C}$ , es la temperatura de referencia.

$$Q_{IN}(MJ) = m_{L2}Cp_{lodos}(T_{L2} - T_{ref}) + m_{H1}Cp_{cw}(T_{L2} - T_{ref}) + m_{aire}Cp_{aire}(T_{eaire} - T_{ref})$$

[Ec.7]

Sustituyendo en la ecuación  $Q_{IN} = 3143,707 \text{ MJ}$

$$Q_{OUT}(MJ) = m_{gas}Cp_{gas}(T_{sgas} - T_{ref}) + m_{cen}Cp_{cen}(T_{cenizas} - T_{ref}) + m_{H2O}evap\lambda$$

[Ec.8]

Aplicando la ecuación (8) obtenemos  $Q_{OUT} = 21249,45 \text{ MJ}$

Hay que tener en cuenta que toda esta energía no será energía útil, ya que se producen pérdidas por distintos motivos. Algunos de estos motivos son las ineficiencias durante el proceso de combustión, así como las eficiencias de las calderas. Por lo tanto, se supone un 15% en pérdidas, calculándose con la siguiente ecuación:

$$Q_{peridas}(MJ) = 15\% \cdot Q_{IN}$$

[Ec.9]

Por lo tanto, se obtiene una energía perdida de 471,56 MJ.

Por último, hay que calcular el calor de combustión del combustible, y para ello se necesita aplicar a la *ecuación (10)*, en la cual aparece el Poder calorífico de los residuos que habrá que determinarlo.

El poder calorífico de los residuos podría calcularse mediante un método analítico, realizando las reacciones de combustión de cada uno de los componentes de salida de gases multiplicados por la cantidad centesimal en que intervienen y sumándose, pero es un método más trabajoso.

Por ello, se decide aplicar la Ecuación de Dulong, que según el autor S.A. Channiwala et.al., [35] hay una correlación unificada para el cálculo del mayor valor de calentamiento a partir del análisis elemental de combustibles. Se ha establecido para combustibles con un amplio rango de composición elemental, es decir, C - 0.00–92.25%, H - 0.43–25.15%, O - 0.00–50.00%, N - 0.00–5.60%, S - 0.00– 94.08% [35].

Para ello se ha establecido que la Ecuación de Dulong en base seca se estimará a la siguiente *ecuación (10)*, siendo Y la cantidad centesimal de cada compuesto en peso por kilogramo combustible.

$$P_{Clodos} (MJ) = (34,43 \cdot Y_C) + (119,2 \cdot Y_H) - (11,3 \cdot Y_O) + (2,4 \cdot Y_N) + (9,3 \cdot Y_S)$$

[Ec. 10]

Es un valor que debe estar aproximadamente entre 10 y 15 MJ/kg. Sustituyendo esta ecuación da un resultado de  $P_{Clodos} = 14,43 \text{ MJ/kg}$ .

Una vez obtenido el poder calorífico de los lodos se puede calcular el calor de combustión del combustible mediante la *ecuación (11)*, que se alcanzará un valor de 103012,692 MJ.

$$Q_{CC} (MJ) = m_{L2} \cdot P_{Clodos}$$

[Ec.11]

Finalmente, una vez obtenido todos los calores que intervienen en la *ecuación (6)*, recogidos en la *tabla 10*, podrá calcularse la energía total que desprende el sistema aplicando dicha ecuación.

$$Q = 84435,39 \text{ MJ}$$



| CALORES (Q)                      |           |
|----------------------------------|-----------|
| <b>Q<sub>in</sub> (MJ)</b>       | 3143,71   |
| <b>Q<sub>out</sub> (MJ)</b>      | 21249,45  |
| <b>Q<sub>perdidas</sub> (MJ)</b> | 471,56    |
| <b>Q<sub>cc</sub> (MJ)</b>       | 103012,69 |
| <b>Q (MJ)</b>                    | 84435,39  |

Tabla 10. Caracterización energética del sistema de combustión.

Después del cálculo del calor de combustión, se va a poder calcular la eficiencia de de combustión aplicando la siguiente ecuación:

$$\eta_{COM} = \frac{(Q_{CC} + Q_{IN} - Q_{OUT})}{(Q_{CC} + Q_{IN})}$$

[Ec.12]

Sustituyendo en esta ecuación los valores correspondientes indicados en la *tabla 11*, se obtiene un rendimiento de combustión de 80,1 %.

A partir de este valor se podrá obtener el rendimiento de la caldera, teniendo en cuenta que habrá que suponer la eficiencia térmica que mide la efectividad del intercambio de calor que se genera en la caldera y la ineficiencia debido a las cenizas y agua de la caldera, que supone ciertas pérdidas. Para esta suposición se tiene en cuenta:

- Para la eficiencia térmica se evalúan una serie de eficiencias en diferentes plantas, suele estar entre 90-95%, por ello se establece un 92% para nuestra caldera.
- Según el documento BREF, se establece un 3% de pérdidas debido a las cenizas y agua de la caldera [36].

Aplicando estos valores de eficiencia a la *ecuación (13)*, se obtiene un rendimiento de la caldera del 71,4 %, un valor que se aleja del rango que ofrece el estudio publicando en el BREF [36].

$$\eta_C = \eta_{COM} \cdot \eta_T \cdot \eta_P$$

[Ec.13]

Una vez calculado este calor del sistema de combustión y el rendimiento de la caldera, se necesitaría obtener las condiciones de vapor para obtener la eficiencia eléctrica final.

Para ello, los gases de salida se ponen en contacto con una corriente de agua en la caldera para transferir ese calor de combustión a la corriente de agua, esto lo que hace es producir vapor a una cierta temperatura de saturación (vapor saturado) que alimentará a la turbina. Al expandir vuelves a enfriar esta corriente y este sería el ciclo que se lleva a cabo para la producción de electricidad mediante el generador.

Suponiendo que un 10% de la energía se consume de forma interna, se determinará que el rendimiento interno

es de un 90% y así se obtiene la energía que va a ser útil para ser producir vapor, dando como resultado de la ecuación (14) un rendimiento de la producción de vapor del 64,3 %.

$$\eta_V = \eta_C \cdot \eta_I$$

[Ec.14]

Con ese rendimiento se va a calcular la energía total que se va a utilizar para producir ese vapor, aplicando la ecuación (15), y con esta energía calculada se obtendrá la cantidad de vapor que se va a producir, sustituyendo en la ecuación (16).

$$E_{vapor} \left( \frac{MJ}{año} \right) = (Q_{CC} + Q_{IN} - Q_{OUT}) \cdot \eta_V$$

[Ec.15]

Sustituyendo en la anterior ecuación obtenemos un valor de energía para producir vapor de 54.240,5 MJ/año.

$$M_{vapor} \left( \frac{kg}{año} \right) = \frac{E_{vapor} (MJ/año)}{h_{450} - h_{150}}$$

[Ec.16]

Los parámetros de vapor, al igual que anteriormente, se van a obtener de un valor medio del rango en el que operan determinadas plantas:

- Se va a estimar que la planta opera a 50 bar, ya que el rango estaría entre 40-70 bar.
- Para la temperatura se estima que la planta opera a una temperatura elevada de 450 °C.

Como conclusión de estas dos suposiciones, se debe saber las entalpías necesarias para la ecuación, donde  $h_{450}$  a 50 bar y  $h_{150}$  a 50 bar tendrán un valor de 3315,50 kJ/ kg y 554,45 kJ/ kg, respectivamente.

Se obtiene un caudal de vapor de 19,65 kg/año.

Por último, se va a estimar una eficiencia eléctrica de un 25% en nuestra planta, ya que el rango de eficiencia estaría entre 22-28 para planta que sólo producen electricidad. Por tanto, se calcula la potencia eléctrica suministrada con la siguiente ecuación:

$$P_{electrica} \left( \frac{MJ}{año} \right) = E_{vapor} \left( \frac{MJ}{año} \right) \cdot \eta_E$$

[Ec.17]

Se obtiene una potencia eléctrica de 13.560,13 MJ/año.

Este valor obtenido, es bastante pequeño pero el principal objetivo de estas plantas es reducir el volumen de lodos. Por tanto, el proceso sería energéticamente suficiente, ya que la potencia eléctrica obtenida se podría aprovechar, aunque fuese poca, en las propias plantas depuradoras.

# ANEXO I

| COMPUESTOS                | CORRIENTE 1 | CORRIENTE 2 | CORRIENTE 3 | CORRIENTE 4 | CORRIENTE 5 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>C</b>                  | 2215,22     | 2215,22     | -           | -           | 2215,22     |
| <b>H</b>                  | 351,10      | 351,10      | -           | -           | 351,10      |
| <b>N</b>                  | 358,97      | 358,97      | -           | -           | 358,97      |
| <b>S</b>                  | 102,09      | 102,09      | -           | -           | 102,09      |
| <b>O</b>                  | 2088,45     | 2088,45     | -           | -           | 2088,45     |
| <b>C quemado</b>          | -           | -           | -           | -           | -           |
| <b>Cenizas</b>            | 1554,56     | 1554,56     | -           | -           | 1554,56     |
| <b>Aire</b>               | -           | -           | 9219,53     | -           | -           |
| <b>H<sub>2</sub>O</b>     | 1318,49     | 1318,49     | -           | 854,64      | 463,85      |
| <b>CO<sub>2</sub></b>     | -           | -           | -           | -           | -           |
| <b>CO</b>                 | -           | -           | -           | -           | -           |
| <b>SO<sub>2</sub></b>     | -           | -           | -           | -           | -           |
| <b>N<sub>2</sub></b>      | -           | -           | -           | -           | -           |
| <b>O<sub>2</sub></b>      | -           | -           | -           | -           | -           |
| <b>NO</b>                 | -           | -           | -           | -           | -           |
| <b>NO<sub>2</sub></b>     | -           | -           | -           | -           | -           |
| <b>NH<sub>3</sub></b>     | -           | -           | -           | -           | -           |
| <b>Ca(OH)<sub>2</sub></b> | -           | -           | -           | -           | -           |
| <b>CaSO<sub>3</sub></b>   | -           | -           | -           | -           | -           |
| <b>Hierro</b>             | 254,01      | 254,01      | -           | -           | 254,00      |
| <b>Aluminio</b>           | 100,045     | 100,04      | -           | -           | 100,05      |
| <b>Níquel</b>             | 0,16        | 0,16        | -           | -           | 0,16        |
| <b>Cobre</b>              | 1,44        | 1,44        | -           | -           | 1,44        |
| <b>Cromo</b>              | 0,39        | 0,39        | -           | -           | 0,39        |
| <b>Cadmio</b>             | 0,014       | 0,01        | -           | -           | 0,01        |
| <b>Zinc</b>               | 5,59        | 5,59        | -           | -           | 5,59        |
| <b>Plomo</b>              | 0,50        | 0,50        | -           | -           | 0,50        |
| <b>Mercurio</b>           | 0,01        | -           | -           | -           | 0,01        |

| CORRIENTE 6 | CORRIENTE 7 | CORRIENTE 8 | CORRIENTE 9 | CORRIENTE 12 | CORRIENTE 13 |
|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| -           | -           | -           | -           | -            | -            |
| -           | -           | -           | -           | -            | -            |
| -           | -           | -           | -           | -            | -            |
| -           | -           | -           | -           | -            | -            |
| -           | -           | -           | -           | -            | -            |
| 41,97       | -           | -           | -           | -            | -            |
| 1357,15     | -           | -           | -           | -            | -            |
| -           | 47554,82    | -           | -           | -            | -            |
| -           | -           | -           | 3779,5      | 3779,5       | -            |
| -           | -           | -           | 7171,7      | 7171,7       | -            |
| -           | -           | -           | 507,09      | 507,09       | -            |
| -           | -           | -           | 204,18      | 204,18       | -            |
| -           | -           | -           | 38008,03    | 38008,03     | -            |
| -           | -           | -           | 2835,74     | 2835,74      | -            |
| -           | -           | -           | 57,69       | 57,69        | -            |
| -           | -           | -           | 88,45       | 88,45        | -            |
| -           | -           | 65,382      | -           | -            | -            |
| -           | -           | -           | -           | -            | 349,14       |
| -           | -           | -           | -           | -            | -            |
| 228,60      | -           | -           | 25,40       | 25,40        | -            |
| 87,04       | -           | -           | 13,001      | 13,001       | -            |
| 0,02        | -           | -           | 0,14        | 0,14         | -            |
| 1,34        | -           | -           | 0,101       | 0,101        | -            |
| 0,08        | -           | -           | 0,31        | 0,31         | -            |
| 0,01        | -           | -           | 0,01        | 0,01         | -            |
| 3,36        | -           | -           | 2,24        | 2,24         | -            |
| 0,201       | -           | -           | 0,30        | 0,30         | -            |
| 0,001       | -           | -           | 0,003       | 0,003        | -            |

| CORRIENTE 14 | CORRIENTE 15 | CORRIENTE 16 | CORRIENTE 17 | CORRIENTE 19 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| -            | -            | -            | -            | -            |
| -            | -            | -            | -            | -            |
| -            | -            | -            | -            | -            |
| -            | -            | -            | -            | -            |
| -            | -            | -            | -            | -            |
| -            | -            | -            | -            | -            |
| -            | -            | -            | -            | -            |
| -            | -            | -            | -            | -            |
| 3834,63      | -            | 3834,63      | -            | 3834,63      |
| 7171,7       | -            | 7171,7       | -            | 7171,7       |
| 507,09       | -            | 507,09       | -            | 507,09       |
| 8,1672       | -            | 8,1672       | -            | 8,1672       |
| 38008,03     | -            | 38008,03     | -            | 38008,03     |
| 2835,74      | -            | 2835,74      | -            | 2835,74      |
| 57,69        | -            | 57,69        | -            | 57,69        |
| 88,45        | -            | 88,45        | -            | 88,45        |
| -            | -            | -            | -            | -            |
| -            | 116,38       | -            | -            | -            |
| 18,38        | 349,14       | -            | 18,376       | -            |
| 1,27         | 24,13        | 0,0253       | 1,24         | 0,02         |
| 0,65         | 12,35        | 0,0133       | 0,64         | 0,013        |
| 0,01         | 0,13         | 0,0004       | 0,007        | 0,0001       |
| 0,001        | 0,09         | 0,0001       | 0,005        | 0,0001       |
| 0,02         | 0,298        | 0,0003       | 0,015        | 0,0003       |
| 0,003        | 0,01         | 6,2387E-05   | 0,003        | 6,23867E-05  |
| 0,112        | 2,13         | 0,002        | 0,109        | 0,002        |
| 0,09         | 0,213        | 0,002        | 0,088        | 0,002        |
| 0,002        | 0,0013       | 4,3237E-05   | 0,002        | 4,3237E-05   |

Tabla 11. Balance de materia de todas las corrientes de la planta.



# REFERENCIAS

- [1] Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/lodos-depuradora/>
- [2] Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación.
- [3] Situación potencial de valorización energética directa de residuos, IDAE, 2011-2020, Estudio técnico.
- [4] Asociación Española de Abastecimiento de Agua y Saneamiento: [http://www.conama.org/conama/download/files/conama2016/STs%202016/1998972205\\_ppt\\_OHerrero.pdf](http://www.conama.org/conama/download/files/conama2016/STs%202016/1998972205_ppt_OHerrero.pdf)
- [5] Ecologistas en acción, La incineración de residuos en España, 2007.
- [6] Alternativas a la incineración, junio 2017, Energías Renovables.
- [7] Alternativas para el tratamiento avanzado, Informe.
- [8] Tablas y Diagramas termodinámicos: <https://www.modeloingenieria.edu.ar/>
- [9] Xingzhou Yang, Jingyue Wei, GuojieYe, Yasi Zhao, Zemin Li, Guanglei Qiu, Fusheng Li, he correlations among wastewater internal energy, energy consumption and energy recovery/production potentials in wastewater treatment plant: An assessment of the energy balance, Science of The total Environment, 2019, Volumen 714.
- [10] Consejo de Seguridad Nacional: <https://www.csn.es/tratamiento-de-residuos-radiactivos1>
- [11] Valorización energética de RSU, Pablo Mancebo Fernández (2018/ 2019), TFM.
- [12] Secado térmico de lodos a baja temperatura, Veolia: [http://www.veoliawatertechnologies.es/tecnologias/secado\\_termico/](http://www.veoliawatertechnologies.es/tecnologias/secado_termico/)
- [13] Andritz Separation: [http://www.andritzgouda.com/es/index.php/proceslijn/Sludge\\_treatment\\_process/](http://www.andritzgouda.com/es/index.php/proceslijn/Sludge_treatment_process/)
- [14] Combustion, quemadores, controles y sistemas de seguridad de llama. proceso basico de combustión, capítulo 11, Informe. [http://recursosbiblio.url.edu.gt/publicjlg/biblio\\_sin\\_paredes/fac\\_ing/manu\\_cald/cap/11.pdf](http://recursosbiblio.url.edu.gt/publicjlg/biblio_sin_paredes/fac_ing/manu_cald/cap/11.pdf)
- [15] Wiki EOI, sección 5:



- [https://www.eoi.es/wiki/index.php/Calderas\\_generadores\\_de\\_vapor\\_hornos\\_y\\_secaderos\\_en\\_Eficiencia\\_energ%C3%A9tica](https://www.eoi.es/wiki/index.php/Calderas_generadores_de_vapor_hornos_y_secaderos_en_Eficiencia_energ%C3%A9tica)
- [16] Centrales de Generación de energía eléctrica, Fernandez Diego I, Robles Díaz A.R, Universidad de Cantabria, informe.
- [17] Agencia estatal Boletín Oficial del Estado, Real Decreto 653/2003, de 30 de mayo, incineración de residuos.
- [18] Calcinor, La cal en el tratamiento de gases:  
<https://www.calcinor.com/es/actualidad/2017-08-07/cal-tratamiento-gases/>
- [19] Desarrollo del plan estratégico del sector de la valorización energética de residuos, Ramón García Déniz, Héctor Mendoza Guzmán, Gonzalo Piernavieja Izquierdo, Salvador Suárez García, Diciembre 2013, Informe.
- [20] Echeverri Londoño, Carlos Alberto, Diseño óptimo de ciclones, revista de la Universidad de Medellín, Diciembre 2016, Vol. 5.
- [21] Revista Ingenierías Universidad de Medellín, Revista científica:  
<https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/about>
- [22] Diseño de un filtro de Mangas para sistema de depuración, Rosa Vázquez, 2019, Informe.
- [23] Diseño de un filtro de Magas, Henry Ramirez Trujillo, Mayo 2012, Informe.
- [24] Vías de tratamiento y valorización de Fangos de depuradora , Xavier Elias et. al, Reciclaje de residuos industriales (año 2012).
- [25] Combustión del carbón, Jimenez S. Científico titular del CSIC (2012), Gobierno de España.
- [26] Werther, J. y Ogada, T. (1999) Combustión de lodos de aguas residuales. Progreso en energía y ciencia de la combustión, 25, 55-116.
- [27] Fundación Crana, Fundazioa:  
[http://www.crana.org/es/contaminacion/mas-informacion\\_3/monaxido-carbono](http://www.crana.org/es/contaminacion/mas-informacion_3/monaxido-carbono)
- [28] Reducción de óxidos metálicos, Pilar Escudero y Lorenzo Martín, Informe.
- [29] Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes:  
<http://www.prtr-es.es/Ni-Niquel-y-compuestos,15609,11,2007.html>
- [30] Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes:  
<http://www.prtr-es.es/Cr-Cromo-y-compuestos,15606,11,2007.html>
- [31] Metales: Propiedades químicas y Toxicidad, Sumario.  
<https://www.insst.es/documents/94886/162520/Cap%C3%ADtulo+63.+Metales+propiedades+qu%C3%ADmicas+y+toxicidad>
- [32] Mercurio y metales tóxicos en cenizas provenientes de procesos de combustión e incineración, Violeta Mugica, Ma. Antonieta Amador, Miguel Torresy José de Jesús Figuero (mayo 2003), Rev. Int. Contam. Ambient.

- [33] Determinación de metales pesados en partículas respirables e identificación de fuentes de emisión, a partir de un muestreo atmosférico en la localidad de Puente Aranda en la ciudad, Luisa Fernanda Perez Fadul y Liliana Hernandez Hernandez (2006), Tesis.
- [34] Climograma Sevilla:  
<https://es.climate-data.org/europe/espana/andalucia/sevilla-2933/>
- [35] Channiwala A. y PP Parikh B. (2002) A unified correlation for estimating HV of solid, liquid and gaseous fuels.
- [36] Mejores técnicas disponibles de referencia europea para la incineración de residuos, Ministerio de medio ambiente, 2011, Documento BREF.

---

# GLOSARIO

---

EDAR - Estación Depuradora de Aguas Residuales

BREF - Documentos de Referencia europeos sobre las mejores técnicas disponibles.

UE - Unión Española

AEAS - Asociación Española de abastecimiento de Aguas y Saneamiento

RSU – Residuo Sólido Urbano.

PCI – Poder calorífico inferior

PClodos - Poder calorífico de los lodos

RNCS – Proceso de Reducción No Catalítica Selectiva

RD – Real Decreto

BOE – Boletín Oficial del Estado

IDEA – Estudio para la Diversificación y Ahorro de la Energía