



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Estudio técnico y económico de una planta incineradora
para la gestión residuos en forma de lodos de depuración
de aguas residuales

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

AUTOR/A: Cantón Pallás, Anabel

Tutor/a: Fombuena Borrás, Vicent

Cotutor/a externo: LERMA CANTO, ALEJANDRO

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

RESUMEN

“Estudio técnico y económico de una planta incineradora para la gestión de residuos en forma de lodos de depuración de aguas residuales”

En este proyecto se realiza un estudio técnico y económico sobre el diseño de una planta incineradora de lodos de depuradora, que se quiere implantar en la Comunidad Valenciana, más concretamente en la provincia de Alicante muy cerca de la cementera propiedad de la empresa CEMEX con el fin de aprovechar el calor producido por la cementera para poder secar los lodos. Según el BREF, se valora que la mejor tecnología de incineración para el diseño de dicha planta incineradora es un horno de lecho fluidizado o de borbote, debido a que es el que más se ajusta a las condiciones que presentan nuestros residuos a tratar. Seguidamente, una vez conocido la tecnología de incineración, se establece que la cantidad de lodos a tratar sea de 384 000 toneladas anuales en materia húmeda.

A continuación, debido al proceso de combustión de los lodos, se van a generar ciertos gases denominados gases de combustión que van a ser contaminantes a la atmósfera, por lo que se deberán de tratar. En dicha planta incineradora según los estudios de cálculo realizado se van a implementar 3 tratamientos: reducción no catalítica selectiva (RNCS), sistema semihúmedo con recirculación y un sistema de adsorción con carbón activo. Dichas emisiones de gases están reguladas por la UE y hay que mantenerse en los límites establecidos.

Además, dicha planta tiene una parte de revalorización energética por lo que se generan 4623 kW al año, lo cual se puede aprovechar para vender y generar un pequeño beneficio.

Finalmente, se ha realizado un estudio económico, donde se ha obtenido que la inversión inicial a este proyecto es de 47 millones de euros y el coste que supone tratar una tonelada de lodos es de 19.25 €.

Palabras clave: Planta incineradora, lodos depuradora, beneficio energético, balance de materia.

SUMMARY

"Technical and economic study of an incineration plant for the management of waste in the form of sewage sludge from wastewater treatment plants".

In this project a technical and economic study is carried out on the design of a sewage sludge incineration plant to be set up in the Valencian Community, more specifically in the province of Alicante, very close to the cement works owned by the company CEMEX, in order to take advantage of the heat produced by the cement works to dry the sludge. According to the BREF, the best incineration technology for the design of this incineration plant is a fluidised bed or bubbling furnace, as it is the most suitable for the conditions of the waste to be treated. Next, once the incineration technology is known, it is established that the amount of sludge to be treated is 384,000 tonnes per year in wet material.

Then, due to the sludge combustion process, certain gases called combustion gases will be generated, which will pollute the atmosphere and must therefore be treated. In this incineration plant, according to the calculation studies carried out, 3 treatments will be implemented: selective non-catalytic reduction (SCNR), a semi-wet system with recirculation and an adsorption system with activated carbon. These gas emissions are regulated by the EU and must be kept within the established limits.

In addition, this plant has an energy revalorisation part which generates 4623 kW per year, which can be used to sell and generate a small profit.

Finally, an economic study has been carried out, where it has been obtained that the initial investment for this project is 47 million euros and the cost of treating one tonne of sludge is 19.25 euros.

Keywords: incineration plant, sewage sludge, energy efficiency, material balance.

RESUM

“Estudi tècnic i econòmic d'una planta incineradora per a la gestió de residus en forma de llots de depuració d'aigües residuals”

En aquest projecte es realitza un estudi tècnic i econòmic sobre el disseny d'una planta incineradora de llots de depuradora, que es vol implantar a la Comunitat Valenciana, més concretament a la província d'Alacant molt prop de la *cementera propietat de l'empresa CEMEX amb la finalitat d'aprofitar la calor produïda per la cementera per a poder assecar el llots. Segons el BREF, es valora que la millor tecnologia d'incineració per al disseny d'aquesta planta incineradora és un forn de llit fluïditzat, pel fet que és el que més s'ajusta a les condicions que presenten els nostres residus a tractar. Seguidament, una vegada conegut la tecnologia d'incineració, s'estableix que la quantitat de llots a tractar siga de 384 000 tones anuals en matèria humida.

A continuació, a causa del procés de combustió dels llots, es generaran uns certs gasos denominats gasos de combustió que seran contaminants a l'atmosfera, per la qual cosa s'hauran de tractar. En aquesta planta incineradora segons els estudis de càlcul realitzat s'implementaran 3 tractaments: reducció no catalítica selectiva (RNCS), sistema semihumit amb recirculació i un sistema d'adsorció amb carbó actiu. Aquestes emissions de gasos estan regulades per la UE i cal mantindre's en els límits establits.

A més, aquesta planta té una part de revaloració energètica pel que es generen 4623 kW a l'any, la qual cosa es pot aprofitar per a vendre i generar un xicotet benefici.

Finalment, s'ha realitzat un estudi econòmic, on s'ha obtingut que la inversió inicial a aquest projecte és de 47 milions d'euros i el cost que suposa tractar una tona de llots és de 19.25 €.

Paraules clau: Planta incineradora, llots depuradora, benefici energètic, balanç de matèria.

índice

RESUMEN	1
SUMMARY.....	2
RESUM.....	3
LISTADO DE FIGURAS	6
LISTADO DE TABLAS	7
I. INTRODUCCIÓN	9
I. Introducción.....	10
I.1. Problemática de la gestión de residuos.....	11
I.2. Residuos: Lodos de Depuradora.....	14
I.3. Tratamiento de Lodos.....	18
I.4. Incineración.....	23
I.5. Tipos de Hornos	26
I.5.1. Incineradores de parrilla	26
I.5.2. Hornos rotativos.....	27
I.5.3. Lecho fluidizado.....	28
II. OBJETIVO	32
II.1. Objetivo general.	33
II.2. Objetivos particulares.....	33
II.3. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	34
III. DESARROLLO DEL PROYECTO	35
III.1. Resultados.	36
III.1.1. Datos de las corrientes de entrada	36
III.1.2. Datos de las corrientes de salida	40
III.1.3. Balance de Materia	41
III.1.4. Balance de Energía	57
IV. ESTUDIO ECONÓMICO	65

IV.1. Estudio Económico.....	66
V. CONCLUSIONES.....	72
V.1. Conclusiones	73
VI. APÉNDICES.....	75
VI.1. Referencias	76

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Pirámide de la Jerarquía Europea en la Gestión de Residuos.....	11
Figura 2. Esquema de la generación de lodos en el tratamiento de las aguas residuales y su línea de tratamiento. [6].....	14
Figura 3. Porcentaje del destino final de lodos.....	15
Figura 4. Lodos de depuradora vertidos en un campo como fertilizante.....	16
Figura 5. Porcentaje de la producción de lodos por Comunidades Autónomas.	16
Figura 6. Digestor anaerobio de lodos de carga baja.	19
Figura 7. Esquema de la estabilización aerobia de lodos.....	19
Figura 8. Evolución de la producción de lodos de la Comunidad Valenciana.	21
Figura 9. Destino de los lodos en el 2019.	22
Figura 10. Diagrama de bloques de una instalación de incineración.....	24
Figura 11. Tratamiento de residuos municipales de la Unión Europea en 2019.	25
Figura 12. Parrilla oscilante.....	27
Figura 13. Parrilla reciprocante.	27
Figura 14. Esquema de una instalación incineradora con un horno rotativo..	28
Figura 15. Lecho fluidizado o de borboteo.	29
Figura 16. Lecho fluidizado circulante.	30
Figura 17. Lecho fluidizado rotativo.....	30
Figura 18. Esquema del horno incinerador y sus correspondientes entradas y salidas.....	36

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Composición típica de los lodos industriales y municipales.	20
Tabla 2. Características de la corriente de entrada.	37
Tabla 3. Elementos y composición de los lodos. [9].....	37
Tabla 4. Característica de la entrada de combustible.	38
Tabla 5. Datos estequiométricos oxígeno.	39
Tabla 6. Características de entrada de la corriente de aire.....	39
Tabla 7. Corrientes de entrada a la incineradora.....	40
Tabla 8. Características de las corrientes de Salida.....	41
Tabla 9. Datos característicos del aire en la zona de trabajo.	42
Tabla 10. Concentración de los gases de combustión.....	45
Tabla 11. Emisiones establecidas en diferentes países. [11].....	46
Tabla 12. Reactivos y productos en el tratamiento de urea.	47
Tabla 13. Reactivos y productos del tratamiento de los gases ácidos.....	48
Tabla 14. Gases emitidos a la atmósfera.	50
Tabla 15. Sólidos generados durante el tratamiento de los gases de combustión.	51
Tabla 16. Composición química de los compuestos minoritarios del lodo de depuradora tratado.....	52
Tabla 17. Cantidad de cenizas totales, volantes y escorias.	53
Tabla 18. Composición química de residuos sólidos en las escorias.....	54
Tabla 19. Reacciones de oxidación de los metales pesados.....	55
Tabla 20. Composición química de residuos sólidos en las cenizas volantes.	56
Tabla 21. Características energéticas de los gases de combustión.	58
Tabla 22. Energía por pérdidas de combustión de los gases.....	59
Tabla 23. Características de energía del ZnO.....	60
Tabla 24. Características energéticas de los componentes minoritario de las escorias.	60
Tabla 25. Datos y energía pérdida por cada componente en Escorias.....	61
Tabla 26. Datos y energía pérdida por cada componente en las cenizas volantes.	61
Tabla 27. Resumen estimación de costes más relevantes.....	68
Tabla 28. Resumen de los costes variables.	70

Tabla 29. Precio de la luz de varias compañías eléctricas españolas.	71
--	-----------

I. INTRODUCCIÓN

I. Introducción

La incineración de residuos ya forma parte de la gestión de residuos en más de 40 países y con unas 1200 plantas activas aproximadamente a nivel mundial, no obstante, todavía existen países en los que esta tecnología tiene que ser implantada en mayor proporción si se desea cumplir con la normativa europea de revalorización de residuos.

De acuerdo a lo indicado en el Reglamento de emisiones industriales aprobado en el Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, se define como una “instalación de incineración” a cualquier unidad técnica o equipo fijo o móvil, específico para el tratamiento térmico de residuos con o sin recuperación energética del calor producido por la combustión, incluida la incineración por oxidación de residuos.

En resumen, esta instalación comprende tanto el emplazamiento como la instalación de todas las líneas de incineración y las instalaciones de recepción, almacenamiento y pretratamiento de los residuos, los sistemas de alimentación de residuos, combustible de los gases de combustión y aire, la caldera, las instalaciones de tratamiento de los gases de combustión y de tratamiento de los residuos de incineración, la chimenea así como los dispositivos y sistemas de control de las operaciones de incineración y de registro de las condiciones de operación.

Además, las plantas de incineración de residuos son el método de tratamiento de residuos que puede ser implantado tras el reutilizado o el reciclaje de los residuos ya sean urbanos, industriales, etc.

La incineración se emplea como tratamiento para los residuos, con el objetivo de reducir su volumen y peligrosidad de sustancias potencialmente nocivas. Por tanto, la incineración de residuos es una solución para la gestión de residuos que genera la sociedad. Además, los procesos de incineración se pueden llevar a cabo para la recuperación energética, mineral o química de los residuos. El sector de la incineración varía mucho dependiendo del origen de los residuos, se pueden encontrar varios tipos de residuos según el BREF como son: Residuos sólidos urbanos (RSU) mixtos, residuos voluminosos, residuos comerciales, residuos industriales (RI), entre otros, pero los que se van a tratar en esta planta incineradora son los lodos de depuradora que pueden ser derivados de plantas de tratamiento de aguas residuales, crudos o digeridos. [1]

I.1. Problemática de la gestión de residuos.

La gestión de los residuos se ha convertido en un problema el cual se debe enfrentar la sociedad actual, debido a su generación creciente y su gran impacto en el medio ambiente, social y económico. En España, cada ciudadano genera aproximadamente un kilo y medio de basura al día (RSU), lo que da lugar a unos 547 kg por persona al año y además se debe sumar los residuos asociados a la industria (RI). [2]

Por otro lado, también se originan otro tipo de residuos como consecuencia del saneamiento de medios contaminados, como pueden ser los lodos procedentes del tratamiento de las aguas residuales, los suelos contaminados, etc.

A día de hoy, la sociedad se ha percatado de la importancia de la gestión eficiente de los residuos. Esta gestión se diseña dependiendo el tipo de residuo que se tiene que tratar, por lo que existen abundantes técnicas de tratamiento y aprovechamiento de los residuos. Para la gestión de residuos se ha implantado una jerarquía, mostrada en la Figura 1, donde se da prioridad a la prevención, seguido de la reutilización y reciclado de los desechos, la recuperación energía o valorización energética y la eliminación de los residuos.



Figura 1. Pirámide de la Jerarquía Europea en la Gestión de Residuos.

Por tanto, se pasaría de una economía lineal a una economía circular, ya que como bien he comentado anteriormente, se da más prioridad a la prevención que a la eliminación de los residuos y, además, donde se quiere aprovechar al máximo los recursos materiales de los que disponemos alargando el ciclo de vida de los productos, logrando así mantener el equilibrio entre el progreso y la sostenibilidad. [3]

I. Introducción

El inconveniente más importante de la gestión de residuos es la mala eliminación y tratamiento de estos, ya que genera graves problemas como la emisión de metano a la atmosfera. Además, los depósitos controlados de residuos o vertederos han visto incrementada su superficie y volumen de almacenamiento durante los últimos años, debido a esta falta de eficiencia en la gestión de residuos. Según estudios, son la tercera fuente antropogénica de emisión de metano, y este es uno de los gases más potentes que afectan al efecto invernadero. Otro gran inconveniente y más reciente es el vertido de los residuos a los océanos, el cual provoca un impacto ambiental en la fauna y flora marina.

En Europa a pesar de los avances, la Comisión Europea actualmente cree que aún se siguen perdiendo una gran cantidad de materias primas secundarias en los residuos generados. En 2016, la UE produjo 2500 millones de toneladas de residuos. Un estudio asegura que el consumo global de materiales se duplicará en los próximos cuarenta años, por lo que cada año crecerá en un 70% el volumen de residuos generados de aquí a 2050. Por tanto, en 2018 en el Parlamento Europeo se fijaron objetivos para promocionar el reciclaje, el envasado y el vertido de los residuos, y con ello promover una economía circular. En febrero de 2021, el Parlamento votó un plan de acción sobre economía circular y así poder avanzar hacia una economía neutra en carbono, sostenible y libre de tóxicos, donde la fecha máxima de cumplimiento fuera 2050 [4].

España en 2018 ante las bajísimas tasas de reciclaje, la UE impuso hace más de una década que todos sus miembros debían reciclar en 2020 el 50% de sus residuos municipales, pero en 2020 España estaba en el 36% de reciclaje, por lo que Europa impuso medidas más duras. En 2030 en España se deberá llegar al 60% y en 2035 al 65% de reciclaje, así para el 2035 *“el porcentaje de residuos municipales recogidos separadamente será como mínimo del 50% en peso del total de residuos municipales generado”* así señala la ley de residuos, que sustituyó a la del 2011. [5]

La solución más fácil sería evitar la creación de residuos, pero en nuestra vida cotidiana cada objeto que consumimos se convierte en residuo que necesita de un tratamiento. Según estadísticas de 2017, el 46% de los residuos municipales en la UE se recicla o compostea.

Sin embargo las prácticas de gestión de residuos varían según el país donde nos encontremos, por lo que hay países miembros de la UE donde siguen vertiendo grandes

I. Introducción

cantidades de residuos municipales a vertederos o los envían para incinerar, pero esto es una práctica poco habitual, a no ser que esa energía que se crea cuando se crea se utilice para crear otras energías, mayoritariamente energía eléctrica. [4]

I. Introducción

I.2. Residuos: Lodos de Depuradora.

Los lodos de depuradora son en una mezcla de agua y sólidos del agua residual, como resultado de procesos naturales o artificiales. Estos lodos se generan debido al tratamiento que reciben las aguas residuales. En el esquema de la Figura 2 se muestra la generación de lodos procedentes de aguas residuales y su línea de tratamiento.

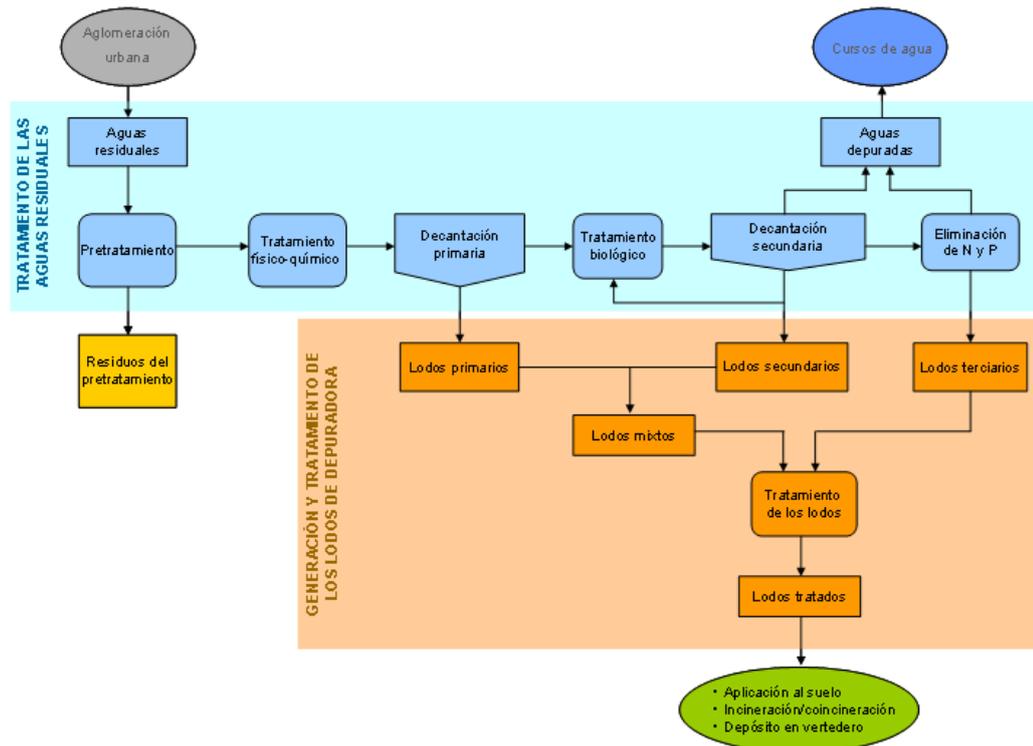


Figura 2. Esquema de la generación de lodos en el tratamiento de las aguas residuales y su línea de tratamiento. [6]

Los lodos poseen más de un 90% de agua y su composición es variable y depende de la carga de contaminación del agua residual. Los tratamientos del agua concentran la contaminación presente en el agua, y contienen amplia diversidad de materias suspendidas o disueltas. Algunas de estas materias suspendidas o disueltas son:

- **Materia orgánica:** nitrógeno, potasio o fósforo, entre otros
- **Metales pesados:** cadmio, cromo, cobre, zinc, etc.
- **Patógenos**

En consecuencia, a la alta carga de contaminación que poseen las aguas residuales, hace que deban tratarse, ya que, si no se hace, al verterse al medio ambiente

I. Introducción

provoca que las concentraciones de materia orgánica o de metales pesados aumenten y en consecuencia se produzca un desequilibrio en los ciclos biogeoquímicos.

Existen dos tipos de lodos, por un lado, los que proceden y son originados por actividades industriales y por otro lado los lodos que proceden de las aguas residuales, que son originadas de forma doméstica. Los lodos procedentes de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) son sometidos a tratamientos específicos, para así reducir su poder de fermentación y su potencial de causar molestias y daños para la salud y el medio ambiente.

Las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), deben asegurar su correcta gestión, y pueden realizarla directamente o encargarla a gestores autorizados, todo ello conforme a lo que establece la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.

Actualmente, aproximadamente un 76% de los lodos generados se utilizan en el sector de la agricultura (Figura 3), por tanto, se debe seguir un marco legal que regula los valores límites de metales pesados y por ello obliga a tratar estos lodos de forma biológica, química o térmica mediante un procedimiento adecuado.

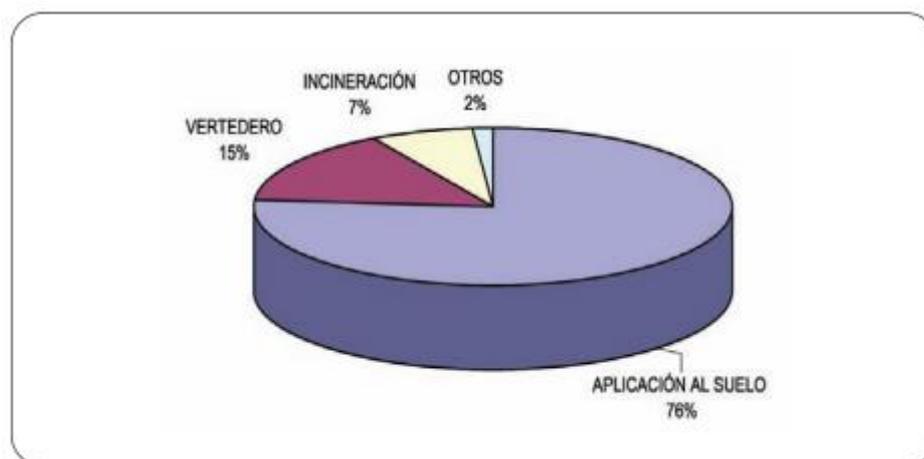


Figura 3. Porcentaje del destino final de lodos.

I. Introducción



Figura 4. Lodos de depuradora vertidos en un campo como fertilizante.

Otras alternativas para reciclar los lodos procedentes de las EDAR pueden ser: la incineración, deposición en vertederos o pasar estos fangos por un proceso de digestión anaerobia y por tanto eliminarlos. Todas estas soluciones se pueden aplicar si los lodos que son considerados no peligrosos, lo cual suponen un 95%, pero si por el contrario son peligrosos, deben de tratarse ya que contienen sustancias peligrosas.

Según los datos del Registro Nacional de Lodos, en España se producen alrededor de 1 200 000 toneladas anuales (en materia seca, m.s.) de estos lodos de depuradora. La comunidad valenciana es la sexta comunidad autónoma con más producción de lodos, la cual genera 357 492 toneladas anuales de materia húmeda de lodos (Figura 5).

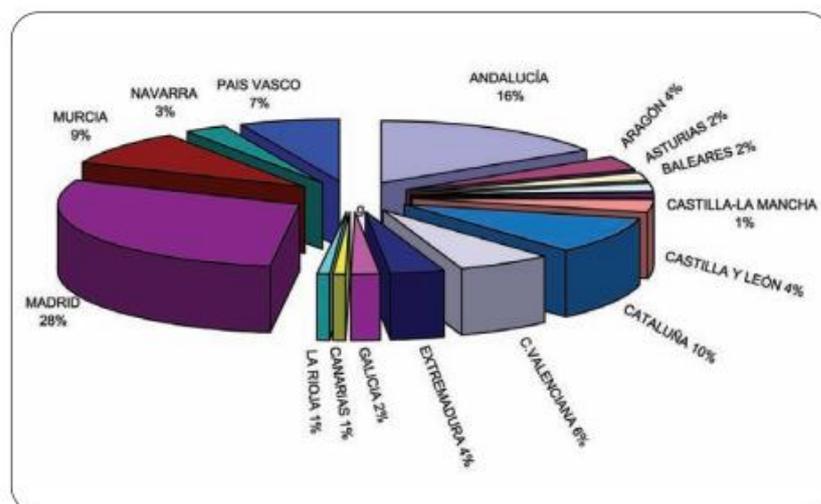


Figura 5. Porcentaje de la producción de lodos por Comunidades Autónomas.

I. Introducción

Estos datos mostrados anteriormente nos indican que hay una enorme cantidad de lodos generados y la sociedad se debería plantear como prevenir esta cantidad de lodos producida aparte de saber que tratamientos aplicar para no dañar el medio ambiente y no producir un impacto medioambiental. La prevención de los lodos se podría conseguir mediante la minimización de las cantidades generadas, la disminución de la contaminación presente en los mismos y por ello se conseguiría la reducción de los impactos que generan en el medio ambiente. Principalmente se debe dar prioridad a disminuir la carga de contaminante en las aguas residuales de modo que está relacionado con el sistema de saneamiento en su globalidad. Así mismo como bien se ha comentado ya, los tratamientos que se realizan en los lodos también pueden incidir en la composición y por lo que deben ser objeto de gestión posterior. [7]

I.3. Tratamiento de Lodos.

Debido a la creciente producción de lodos, la sociedad se debe enfrentar a la gestión de estos lodos ya que se ha convertido en uno de los principales retos debido al impacto ambiental, social y económico. 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 la prevención sobre el reciclado, seguido de la valorización energética y en último lugar el depósito en vertedero.

Generalmente los lodos se tratan en la propia depuradora para reducir su contenido en agua, en patógenos y asegurar la estabilidad de la materia orgánica. Los tratamientos biológicos más frecuentes son: la digestión anaerobia, la estabilización aerobia y el compostaje. Aunque cuando no son tratados en las depuradoras, estos lodos son tratados en instalaciones específicas de tratamiento de residuo.

La digestión anaerobia es un proceso empleado en la estabilización de lodos y se trata de la degradación de la materia orgánica en los lodos en un medio anaerobio, es decir en ausencia de oxígeno. El proceso se lleva a cabo en un reactor o también llamado digestor (Figura 6), el cual puede trabajar de manera continua o discontinua. Hay dos tipos de digestores:

- Baja carga: no se suele calentar ni mezclar el contenido del digestor. Cabe destacar que el tiempo de retención puede variar entre 30 y 60 días.
- Alta carga: el lodo se mezcla mediante recirculación de gas, bombeo, etc. Además, el digestor se calienta para favorecer la velocidad de digestión. En este caso, el tiempo de retención es mucho menor a un digestor de baja carga, generalmente es menor a 15 días.

En definitiva, el lodo que se extrae de este reactor tiene muy bajo contenido de materia orgánica y de microorganismos patógenos vivos.

I. Introducción

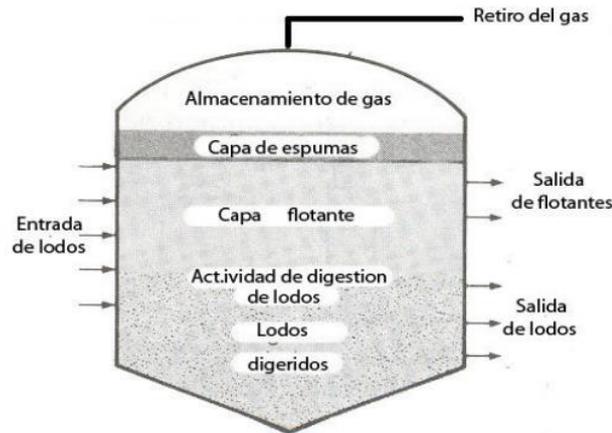


Figura 6. Digestor anaerobio de lodos de carga baja.

La estabilización o digestión aerobias es similar al proceso de lodos activados, donde conforme se agota el suministro de sustrato (alimento), los microorganismos empiezan a consumir su propio protoplasma (respiración endógena) para obtener la energía necesaria para las reacciones de mantenimiento celular. Por tanto, en la reacción indicada a continuación, lo que ocurre es que el tejido celular, si se encuentra en un medio aerobio, se oxida a dióxido de carbono, amoníaco y agua. Por lo general, solo se puede oxidar entre el 75 y el 80% del tejido celular, ya que todo lo demás serán compuestos inertes y compuestos orgánicos no biodegradables. Este proceso de estabilización aerobia se produce como se representa en el esquema de la Figura 7.

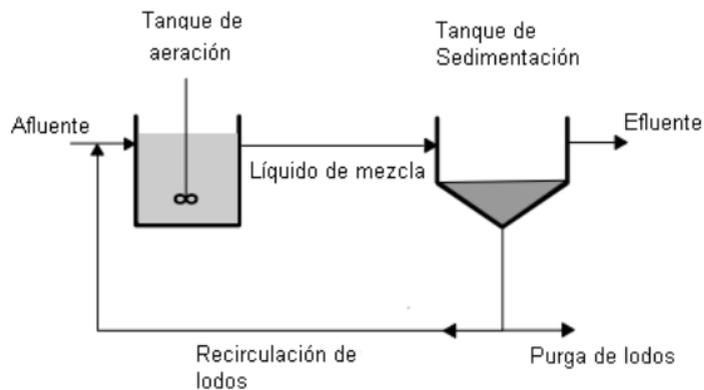
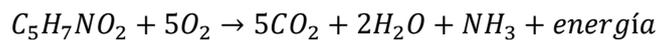


Figura 7. Esquema de la estabilización aerobia de lodos.

I. Introducción

La composición del lodo de depuradora varía mucho en función del estudio consultado o la naturaleza del propio lodo. En la Tabla 1 se indican las composiciones típicas de un lodo de depuradora industrial y municipal deshidratado:

Tabla 1. Composición típica de los lodos industriales y municipales.

Componente	Lodo municipal	Lodo industrial
Materia seca (%)	10-45	-
Materia orgánica (% materia seca)	45-85	-
Metales pesados (mg/kg m.s.)	-	-
Cr	20-77	170
Cu	200-600	1800
Pb	100-700	40
Ni	15-50	170
Sb	1-5	<10
Zn	500-1500	280
As	5-20	<10
Hg	0.5-4.6	1
Cd	1-5	<1
Mo	4-20	-

No obstante, en este estudio, los lodos se van a tratar para valorización energética. 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. Por ello, se propone la incineración como alternativa a la gestión de los lodos de depuradora, con el objetivo de reducir la fracción que se va a ir al vertedero y además para aprovechar el valor energético de los lodos cuando se incineran. Este método de gestión de lodos puede ser una alternativa a procesos donde se requiera una alta demanda de energía, ya que la energía o calor producidos durante la incineración pueden ser empleados como fuente de energía para dichos procesos. En este caso, donde se empleen los lodos como fuente de entrada de la incineración en procesos donde se requiera energía, también

I. Introducción

implicaría una reducción en los gastos de transporte de los lodos desde su producción hasta su destino final de tratamiento.

Por otro lado, con un enfoque más centralizado en la Comunidad Valenciana, esta es una de las comunidades autónomas más avanzadas en materia de infraestructuras de reutilización, disponiendo de 44 EDAR con un tratamiento terciario o avanzado con una capacidad total de tratamiento de 33.93 hm³/año. Como consecuencia del tratamiento y depuración de las aguas residuales se producen los lodos de depuración. Estos lodos poseen materia orgánica y nutrientes que los convierten en una solución orgánica de fertilizante ideal para la agricultura, siendo esta comunidad autónoma el destino más adecuado ya que posee suelos pobres en materia orgánica y una importante actividad agrícola. La aplicación de los lodos en agricultura se regula a través del Real Decreto 1310/1990, que establece los requisitos y cualidades fisicoquímicas que deben cumplir los lodos para su utilización en el sector agrario. En caso de que los lodos no cumplan los límites establecidos en dicho Real Decreto, estos se destinan a secado térmico y posteriormente a valorización energética.

La evolución de la producción de lodos durante los últimos años se muestra en la Figura 8.

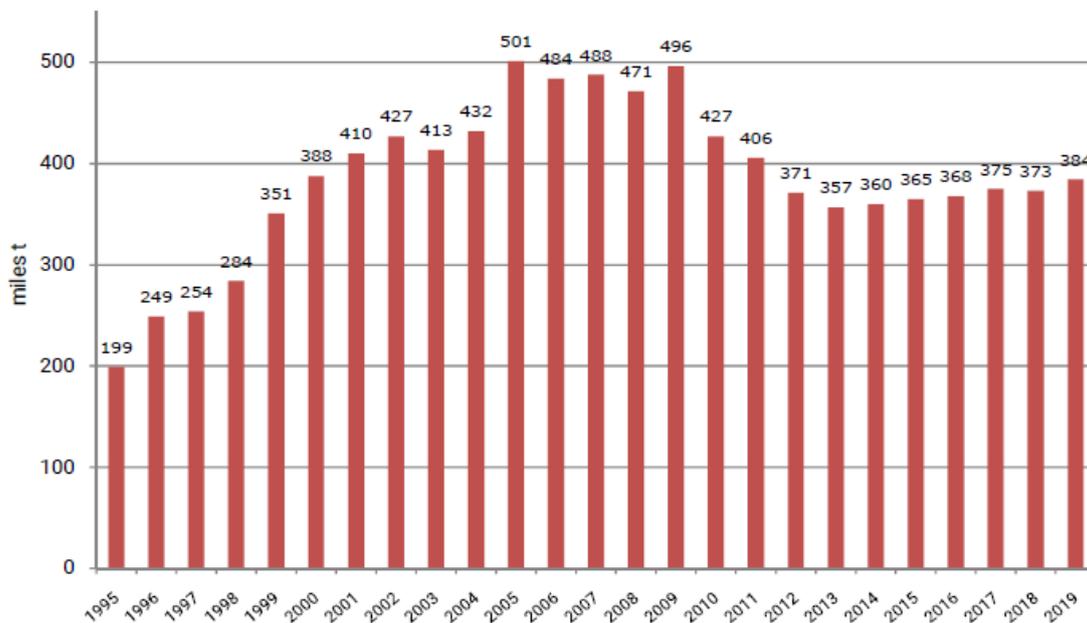


Figura 8. Evolución de la producción de lodos de la Comunidad Valenciana.

Como se observa, en el año 2019 se produjeron un total de 384.176 toneladas de materia húmeda de lodos, lo cual supone un incremento del 3% en la producción de

I. Introducción

lodos respecto al año anterior, mientras que la carga tratada en las depuradoras se ha incrementado en un 4.1%. En este caso, se va a tomar como volumen de lodos a tratar el generado en el ejercicio del 2019. A continuación, en la siguiente grafica (Figura 9) se puede ver la distribución final de los lodos en la Comunidad Valenciana.

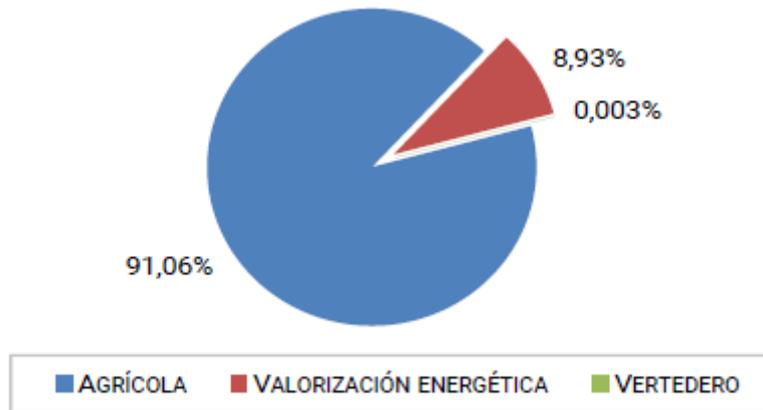


Figura 9. Destino de los lodos en el 2019.

En ella se observa que la mayoría de los lodos se destinan para el sector agrícola con un 91.06%, seguidamente con un 8.93% se destinan para valorización energética y solo un 0.003% para los vertederos, lo cual es una buena noticia ya que esto quiere decir que las leyes medioambientales que se implantaron se están cumpliendo y cada vez más, menos cantidad de lodos se desechan en vertederos que son una gran fuente de contaminación medioambiental. [8]

I.4. Incineración.

La incineración se utiliza como tratamiento para una extensa clase de residuos que genera la sociedad y a su vez permite la gestión de los mismos. El sector de la incineración ha desarrollado un gran cambio tecnológico en los últimos 10-15 años debido a que se han impulsado legislaciones específicas para dicho sector y se han reducido las emisiones a la atmosfera de las instalaciones de incineración.

La finalidad de la incineración es tratar los residuos con el fin de reducir su volumen y peligrosidad para no contaminar el medio ambiente. Además, un tema muy importante de la incineración es que se puede recuperar energía de dicho proceso de la incineración para otros usos o para la propia planta incineradora.

Los residuos son por lo general altamente heterogéneos, consistentes esencialmente en sustancias orgánicas, minerales, metales y agua. Aunque los enfoques varían mucho, el sector de incineración puede dividirse aproximadamente en los siguientes subsectores principales:

- **Incineración de residuos urbanos mixtos:** Normalmente tratan basuras y residuos domésticos mixtos y generalmente sin tratar, pero en ocasiones pueden incluirse ciertos residuos industriales y comerciales.
- **Incineración de residuos urbanos u otros residuos pretratados:** Instalaciones que tratan residuos que han sido recogidos de manera selecta, pretratados o preparados, de modo que las características de los residuos difieren de los residuos mixtos. En este subsector se incluyen las incineradoras de la fracción de residuos no reciclables.
- **Incineración de residuos peligrosos:** Incluye la incineración en plantas industriales y la incineración en plantas comerciales (que normalmente recibe una amplia variedad de residuos).
- **Incineración de lodos de depuradora:** los lodos de depuradora se incineran separadamente de otros residuos en instalaciones específicas, en otros dichos residuos se combinan con otros (ej. residuos urbanos) para su incineración.

I. Introducción

- **Incineración de residuos clínicos:** Hay instalaciones específicas para el tratamiento de residuos clínicos, normalmente los procedentes de hospitales y otras instalaciones sanitarias. En algunos casos, determinados residuos clínicos se tratan en otras instalaciones, por ejemplo, con residuos urbanos mixtos o residuos peligrosos.

En la etapa de combustión, según el rango de temperaturas los compuestos orgánicos y metales pesados se van a evaporar total o parcialmente, por tanto, estas sustancias se transferirán desde el residuo a los gases de combustión y a las cenizas volátiles (polvo) existentes. También se genera cenizas sólidas que se quedan en el fondo del horno, estas cenizas están compuestas principalmente de componentes inorgánicos. Este proceso de combustión se produce debido a un exceso de aire y así asegurarse de que la máxima proporción de combustible reacciona en esta etapa. Cuando el poder calorífico del residuo y el suministro de oxígeno es suficiente, puede producir una reacción térmica en cadena y combustión autoalimentada, lo cual, no es necesario que se añadan otros combustibles. En el siguiente esquema (Figura 10) se puede ver las diferentes etapas de un proceso de incineración.



Figura 10. Diagrama de bloques de una instalación de incineración.

La escala de uso de la incineración, como técnica de gestión de residuos, varía mucho de un lugar a otro. En Europa varía entre el cero y el 62%. En la Figura 11 se puede ver la variación en la capacidad de incineración per cápita de los residuos municipales, en 2019 de los países de la Unión Europea.

I. Introducción

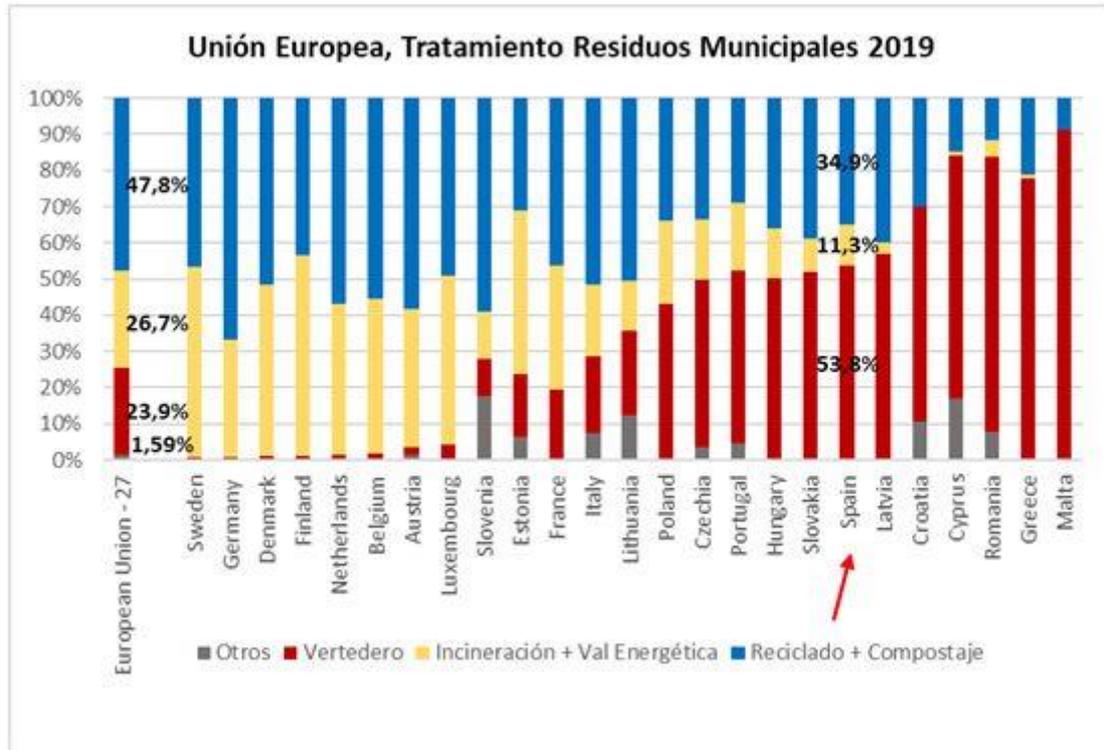


Figura 11. Tratamiento de residuos municipales de la Unión Europea en 2019.

Si bien para una planta incineradora, lo más importante, es el horno donde se va a producir esta incineración. Por ello se van a explicar los distintos tipos de hornos que existen y cuál será el que se utilizará en esta planta incineradora.

I.5. Tipos de Hornos

En la etapa de tratamiento térmico, es decir la combustión, se utilizan distintos tipos de horno según el tipo de residuo que se vaya a tratar. Se pueden encontrar 4 tipos de hornos para el tratamiento térmico, que son:

- Incineradores de parrilla
- Hornos rotativos
- Sistemas de pirólisis y gasificación
- Lechos fluidizados

I.5.1. Incineradores de parrilla

Los incineradores de parrilla son los típicos que se utilizan para los residuos urbanos mixtos, pero también se pueden tratar residuos comerciales e industriales no peligrosos, lodos de depuradora y algunos residuos clínicos.

Este tipo de incineradores, están provistos por parrillas, cuyo movimiento permite la distribución gradual del residuo a lo largo del incinerador. La parrilla de incineración además se encarga de la carga y aflojamiento de los materiales que se quieren incinerar. El objetivo principal de la parrilla de incineración es una buena distribución del aire de incineración en el horno.

Es muy probable que algunos materiales con un tamaño de partícula muy fino se caigan por las aberturas de la parrilla, por tanto, este material se recupera ya que se junta con las cenizas que se generan durante la incineración y que también se caen por la parrilla. Finalmente, estos materiales se separan de la ceniza y se pueden volver a introducir en el incinerador o directamente se retiran para eliminarlos.

Normalmente, se pueden distinguir distintos sistemas de parrillas según el modo de transporte del residuo por la parrilla en la zona de combustión. Entre estos sistemas están:

- Parrillas oscilantes (Figura 12)
- Parrillas reciprocantes o de vaivén (Figura 13)
- Parrillas móviles

I. Introducción

- Parrillas de rodillos
- Parrillas refrigeradas

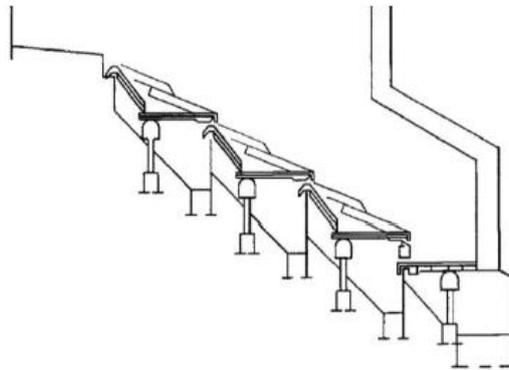


Figura 12. Parrilla oscilante.

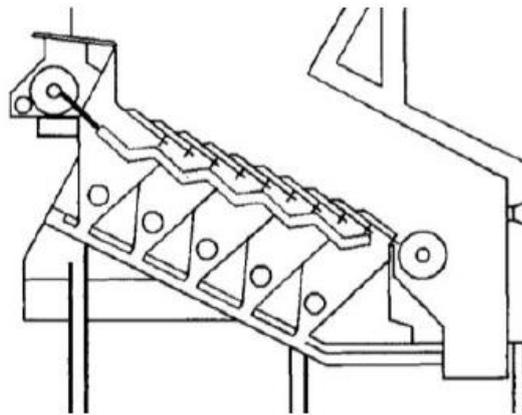


Figura 13. Parrilla reciprocante.

I.5.2. Hornos rotativos

Los hornos rotativos (Figura 14) se caracterizan por tener grandes dimensiones y por lo tanto permiten incinerar cualquier residuo independientemente de su tipo y su composición. Este tipo de hornos se utilizan mayoritariamente para la incineración de residuos peligrosos y para residuos clínicos.

Este tipo de incineradores están formados por un incinerador con tambor rotativo ligeramente inclinado sobre su eje horizontal, y permite que el residuo gire y quede expuesto al aire de combustión. Los residuos se transportan por medio de la gravedad a medida que gira.

I. Introducción

El tiempo de residencia de los residuos viene determinado por el ángulo horizontal del tambor y la velocidad de rotación. Normalmente tienen un tiempo de residencia de entre 30 y 90 minutos.

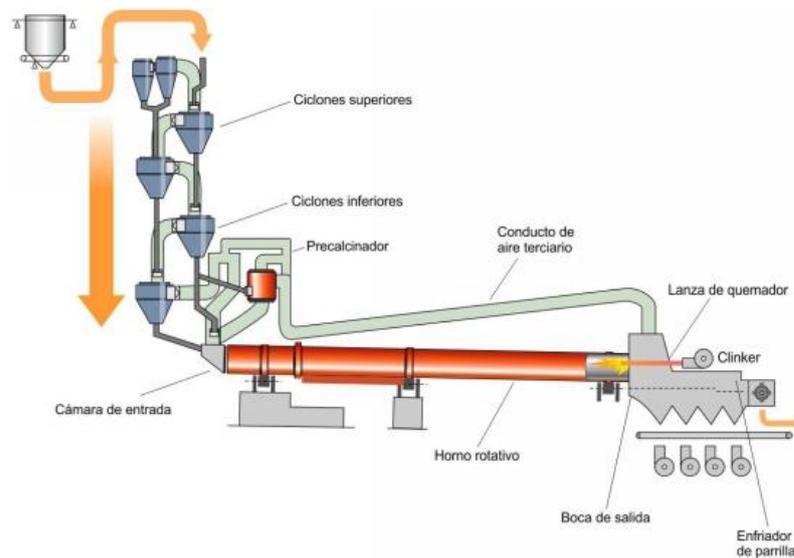


Figura 14. Esquema de una instalación incineradora con un horno rotativo.

1.5.3. Lecho fluidizado

Los incineradores de lecho fluidizado se aplican ampliamente a la incineración de residuos RDF o lodos de depuradora.

Un incinerador de lecho fluidizado es una cámara de combustión revestida en forma de cilindro vertical. En la parte inferior, hay un lecho de un material inerte (arena, piedra caliza o ceniza) sobre una parrilla o placa de distribución provocando que se fluidice con aire. El material del lecho está sostenido por una rejilla refractaria, la cual está perforada para dejar pasar el aire a través de los difusores ubicados debajo de la rejilla. Además, el movimiento del lecho y su capacidad de almacenamiento térmico inherente aumenta la combustión del material y minimiza las cenizas del fondo, además de que provoca una mezcla rápida y uniforme de los residuos.

En el lecho fluidizado se produce el secado, volatilización ignición y combustión. Los residuos deben ser tratados previamente y pasar por una trituradora para conseguir un tamaño de partícula pequeño con un diámetro máximo de 50 mm. Una vez tratados, se insertan dentro del incinerador de forma continua por la parte del lecho inferior y mediante el flujo de aire pasan a la parte superior o lateral. Para el arranque del proceso

I. Introducción

de incineración, el lecho fluidizado debe calentarse al menos a la temperatura mínima de ignición del residuo agregado. Durante la incineración, el lecho fluidizado contiene los residuos sin combustionar y la ceniza producida. El exceso de ceniza se extrae normalmente por el fondo del horno.

Algunos tipos de lechos fluidizados pueden recibir residuos de tamaños de partícula mayores que otros. En tal caso, es posible que los residuos sólo requieran una reducción somera de tamaño. Pueden diferenciarse los siguientes incineradores de lecho fluidizado:

- **Lecho fluidizado estacionario o de borboteo** (Figura 15): Consta de una cámara de incineración revestida cilíndrica o rectangular, un lecho de inyectores y un quemador de arranque situado debajo. Los sólidos del lecho tienen un tamaño entre 750 - 1000 μm y la velocidad del gas esta entre 1 - 3 m/s para asegurar que todas las partículas, que constituyen el lecho, no sean arrastradas por el lecho fluidizante (aprox. 0,5 - 3 mm). La temperatura optima de funcionamiento es 850°C. En este tipo de incinerador los residuos se inyectan por el cabezal o por los laterales mediante cintas transportadoras. En este caso, los residuos deben ser tratados previamente en un proceso de secado para así que el proceso sea más eficiente.

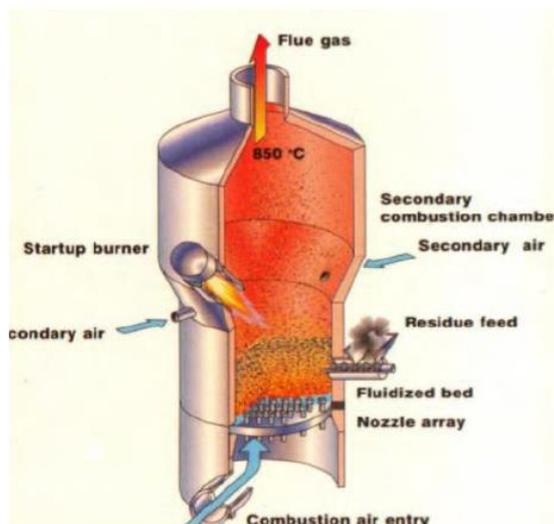


Figura 15. Lecho fluidizado o de borboteo.

- **Lecho fluidizado circulante** (Figura 16): Este tipo de incinerador es muy apropiado para la incineración de lodos de depuradora seco con un elevado valor calorífico. Trabaja con un material de lecho fino y a elevadas velocidades de los

I. Introducción

gases, que eliminan la mayor parte de partículas de sólido de la cámara junto con los gases de combustión. Adyacente al incinerador hay un ciclón ya que se encargará de separar las partículas de los gases y estas finalmente serán redirigidas al incinerador. Este tipo de lecho consigue elevados rendimientos calóricos. La temperatura operativa es entre 850 - 950 °C.

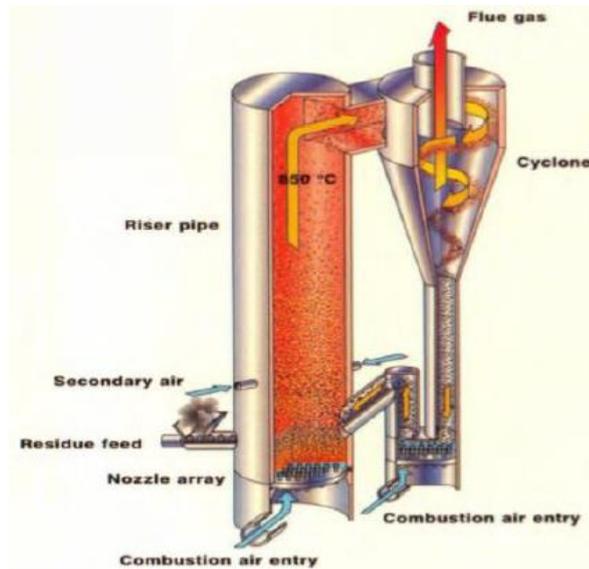


Figura 16. Lecho fluidizado circulante.

- **Lecho fluidizado rotativo** (Figura 17): El lecho se retiene dentro de la cámara de combustión como el lecho estacionario, pero se introduce la circulación dentro de éste. Esto tiene los beneficios de los altos niveles de turbulencia dentro de los lechos, pero en una cámara más pequeña.

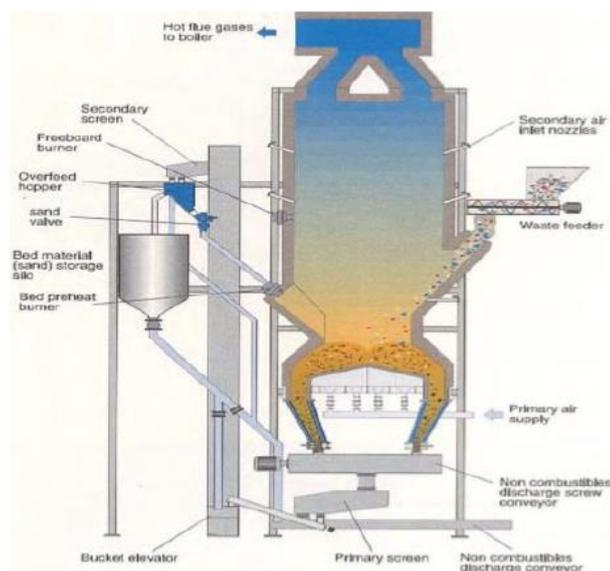


Figura 17. Lecho fluidizado rotativo.

I. Introducción

Por ello, después de explicar todos los tipos de horno que se pueden utilizar en una planta incineradora, para este proyecto se ha escogido un horno de lecho fluidizado, ya que según se ha comentado anteriormente, es un horno muy apropiado para lodos de depuradora. En concreto, se ha seleccionado que el horno de la planta sea un horno de lecho fluidizado de borboteo, debido a que en este horno los lodos de depuradora se incineran mucho mejor que si fuera en un horno de parrilla el cual habría muchas más pérdidas y no sería tan eficiente el proceso. Cabe recalcar que, para este horno, los lodos deben de pasar por un proceso de secado y triturado ya que las condiciones de trabajo del horno lo exigen así. En este proyecto no se estudiará el pretratamiento de los lodos ya que estos se tratarán en una cementera que estará muy cerca de la planta incineradora.

II. OBJETIVO

II. Objetivos

II.1. Objetivo general.

En este proyecto, el objetivo principal es realizar un estudio sobre el tratamiento de lodos de depuradora mediante una planta incineradora y por ello realizar una valorización energética de este proceso. De esta manera, se eliminarán residuos y se aprovechará la energía de este proceso para otras aplicaciones, o incluso para el funcionamiento de la propia planta incineradora.

Para ello, en dicha planta incineradora se van a tratar 384000 tn/año de lodos de depuradora en materia húmeda, en este caso de toda la Comunidad Valenciana. Estos lodos se van a tratar previamente mediante un secado aprovechando las instalaciones cercanas de una cementera, para de esta forma eliminar el agua y por tanto quedarían 288000 tn/año de lodos en materia seca. El tipo de horno que se utilizará para la incineración de los lodos es de lecho fluidizado, ya que son los más apropiados para tratar residuos de consistencia fluida y con tamaños de partícula inferiores a lo habitual de los residuos urbanos y los lodos cumplen estas características. Dado que según las especificaciones técnicas estos hornos no deben tratar cantidades superiores a 8300 kg/h, para el actual proyecto se deberían instalar 5 hornos en paralelo para poder garantizar el tratamiento de todos los lodos producidos.

II.2. Objetivos particulares.

Para el desarrollo del objetivo principal, se establecen varias metas que cumplir, como puede ser:

- Seleccionar el tratamiento térmico para incineración, es decir tipo de horno de la planta incineradora
- Realizar un balance de materia de las entradas y las salidas de lodos y materias primas en la instalación propuesta.
- Realizar un balance de energía, es decir, calcular la energía consumida y producida del proceso para la instalación propuesta
- Calcular y evaluar la potencia eléctrica generada en la instalación mediante la combustión
- Estimar los costes de operación e inversión de la planta incineradora para que funciones todos los equipos seleccionados

II. Objetivos

II.3. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

En cuanto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), el actual proyecto trabaja los siguientes objetivos:

- **Objetivo 9:** Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación. Tal y como se describe en el propio Objetivo, el actual proyecto promueve una industrialización inclusiva y sostenible, los cuales, junto con la innovación y la infraestructura, pueden dar rienda suelta a las fuerzas económicas dinámicas y competitivas que generan el empleo y los ingresos. Estas desempeñan un papel clave a la hora de introducir y promover nuevas tecnologías, facilitar el comercio internacional y permitir el uso eficiente de los recursos.
- **Objetivo 6:** Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos. Si bien se ha conseguido progresar de manera sustancial a la hora de ampliar el acceso a agua potable y saneamiento, existen miles de millones de personas (principalmente en áreas rurales) que aún carecen de estos servicios básicos. En todo el mundo, una de cada tres personas no tiene acceso a agua potable salubre, dos de cada cinco personas no disponen de una instalación básica destinada a lavarse las manos con agua y jabón, y más de 673 millones de personas aún defecan al aire libre.
- **Objetivo 7:** Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna. El mundo está avanzando hacia la consecución del Objetivo 7 con indicios alentadores de que la energía se está volviendo más sostenible y ampliamente disponible. El acceso a la electricidad en los países más pobres ha comenzado a acelerarse, la eficiencia energética continúa mejorando y la energía renovable está logrando resultados excelentes en el sector eléctrico.

El actual proyecto centra su interés dentro de este objetivo en que lleva a cabo una obtención de energía eléctrica a través de un estudio mediante técnicas de incineración de lodos.

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

III. Desarrollo proyecto

III.1. Resultados.

En este apartado se van a explicar los cálculos y el procedimiento seguido para realizar tanto en balance de materia como el balance de energía de la planta incineradora, con el objeto de conocer una estimación de la cantidad de energía eléctrica generada en el proceso y además estimar la cantidad de reactivos necesarios para el proceso de combustión como para el tratamiento de los gases de combustión generados. También se estimarán las emisiones de estos gases de combustión a la atmosfera.

En el siguiente esquema (Figura 18) se puede ver una representación esquemática de las principales corrientes de entrada y salida del horno de lecho fluidizado. Además, aparecen abreviadas como Corriente 1, 2, 3, etc.



Figura 18. Esquema del horno incinerador y sus correspondientes entradas y salidas.

Hay que recordar que los apartados de cálculos y resultados se muestran los resultados para un horno de lecho fluidizado, pero que el diseño de la planta debería contar con 5 hornos en paralelo.

III.1.1. Datos de las corrientes de entrada

Para este trabajo se han tomado como referencia los datos lodos de depuradora de la Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales (abreviadamente EPSAR) de la Comunidad Valenciana de la gestión de 2019. Por tanto, como ya se ha dicho en el objetivo principal se van a tratar 384000 toneladas al año en materia húmeda, con un porcentaje de humedad del 25%. Para facilitar la eficiente energética de la planta incineradora, estos lodos se van a tratar previamente en un proceso de secado para eliminar el mayor porcentaje de agua que tengan. Además, se estima que la instalación estará operativa 8000 h al año. Las características principales de la entrada de lodos se resumen en la Tabla 2. Cabe destacar, que en esta instalación hay 5 hornos, ya que los

III. Desarrollo proyecto

hornos de lecho fluidizado pueden tratar una cantidad máxima de 8333 kg/h al año según cita el BREF.

Tabla 2. Características de la corriente de entrada.

residuos anuales (MH)	384000.00	tn/año
Humedad	25.00	% p/p
residuos anuales por cada horno (MS)	57600.00	tn/año
Horas operativas	8000.00	
Residuos por horno	7.20	tn/hora
Residuos por horno	7200.00	kg/hora

III.1.1.1. Lodos

Como ya se conoce la cantidad de residuo a la entrada ahora se debe determinar qué elementos forman estos lodos y cuál es su porcentaje en estos. Estos datos se pueden ver en la tabla (Tabla 3) y están basados en un promedio de 6 lodos de diferentes tipos tanto municipal como industrial, ya que en este trabajo se recogen todos los lodos de la Comunidad Valenciana.

Tabla 3. Elementos y composición de los lodos. [9]

composición elementos	Mr molecular (kg/kmol)	%	% Recalculado para la entrada	kg/hora	kMoles/hora
C	12.00	28.61	48.97	3526.05	293.84
H	1.00	4.45	7.62	548.44	548.44
N	14.00	3.27	5.60	403.01	28.79
S	32.00	0.95	1.63	117.08	3.66
Cl	35.40	0.18	0.31	22.18	0.6267
O	16.00	20.96	35.88	2583.22	161.45
cenizas	-	40.64	0	-	-
TOTAL (SIN CENIZAS)		58.42	100.00	7200.00	1036.80

Analizando los resultados, se ve que la materia orgánica del lodo está compuesta mayoritariamente de carbono y oxígeno, lo que esto determinará que la composición de los gases que son liberados en el proceso de incineración tenga en mayor proporción CO₂ y también CO. Finalmente, entran al horno un total de 1036.80 kmoles/h de lodo.

III. Desarrollo proyecto

III.1.1.2. Combustible fósil

Seguidamente, se debe determinar la cantidad de combustible que se introduce en el horno para que se produzca la combustión correctamente, por tanto, según el BREF para un horno de lecho fluidizado se necesitan entre 4,5 y 20 m³ por cada tonelada de residuo, por consiguiente, en este proyecto se estiman 6 m³ por cada tonelada de residuo. En la Tabla 4 se resumen las características de la entrada de combustible.

Tabla 4. Característica de la entrada de combustible.

Concepto	Volumen	Unidades
Gas combustible (CH ₄)	6	m ³ /tonelada de residuo
volumen 1 kMol en C.N	22.40	m ³
Masa molecular (CH ₄)	16	kg/kmol
Entrada de CH ₄ por tonelada residuo	4.285	kg CH ₄ /tonelada residuo
Entrada CH ₄ por kg de residuo	0.0042	kg/hora CH ₄ por kg de residuo
Entrada CH ₄	30.85	kg/hora de metano necesarios
Entrada CH ₄	1.929	kmoles/hora de metano necesarios

Por tanto, se necesitarán 1.929 kmol/h de gas natural a la entrada, para que la combustión se realice adecuadamente.

III.1.1.3. Cálculos de la cantidad de aire necesario

En primer lugar, para conocer las composiciones de la corriente de los gases de combustión es necesario determinar cuánto aire es necesario para que se produzca la combustión. Del aire que se aporte dependerá la cantidad de oxígeno disponible, las reacciones que se producen son las siguientes reacciones:

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

Además, se debe agregar el oxígeno necesario para la combustión del combustible, en este caso gas natural. La reacción que tiene lugar es:

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

A partir de las reacciones, sumando la cantidad de oxígeno necesario para cada reacción, se puede calcular los moles totales de O₂ estequiométricos que son necesarios (Tabla 5).

III. Desarrollo proyecto

Tabla 5. Datos estequiométricos oxígeno.

	kmoles O₂ estequiométrico
reacción 1(C)	293.8377
reacción 2 (H)	137.1106
reacción 3 (S)	3.6588
reacción 4 (CH₄)	3.8571
TOTAL	438.46

Para calcular los kmoles de O₂ estequiométrico se ha aplicado la siguiente ecuación:

$$O_2 \text{ estequiométrico (kmol)} = \frac{\text{moles elemento (entrada residuo)} \cdot \text{moles } O_2}{\text{moles elemento}}$$

Además, para asegurarse que hay suficiente aire determinamos un exceso de aire ya que es casi imposible obtener una mezcla homogénea y total del combustible con el comburente (aire u oxígeno directo). Por ello esto obliga a emplear una cantidad real de aire mayor a la estequiométrica, con el propósito de producir una combustión lo más completa posible (Tabla 6). Lo cual significa que debe haber un exceso de aire que se introduzca al horno, en este caso será de un 20%.

Tabla 6. Características de entrada de la corriente de aire.

Oxígeno teórico (kmol)	357.74
Proporción oxígeno en el aire	0.2100
Oxígeno real (kmol)	429.29
Aire real (kmol/h)	2044.2
Aire real (kg/h)	59241
Masa molar Aire	28.98

Los siguientes datos vienen dados de las siguientes ecuaciones:

$$O_2 \text{ real (kmol)} = \text{Exceso de Aire} \cdot O_2 \text{ teorico necesario} + O_2 \text{ teorico necesario}$$

$$\text{Aire real} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{h}} \right) = \frac{O_2 \text{ real (kmol)}}{\% O_2 \text{ en Aire}}$$

$$\text{Aire real} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = \text{Aire real} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{h}} \right) \cdot \text{Masa molecular } O_2 \left(\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right)$$

Por ende, como se ha mencionado anteriormente no se va a suministrar oxígeno puro al horno, si no que va a entrar oxígeno al horno mediante una corriente de aire, por

III. Desarrollo proyecto

lo que se necesitan 59 241 kg/h de aire, para que la combustión se produzca correctamente y no haya ningún fallo de falta de oxígeno.

Seguidamente, para calcular los kmoles de oxígeno teórico total necesario se aplica la siguiente ecuación.

$$\text{kmoles O}_2 \text{ teórico} = \frac{\text{kmoles O}_2 \text{ estequiométrico} - \text{kmoles O}_2 \text{ (entrada residuo)}}{2}$$

A continuación, en la Tabla 7 se muestra un resumen de las corrientes de entrada al horno.

Tabla 7. Corrientes de entrada a la incineradora.

ENTRADAS	kmoles/hora	kg/hora
Total corriente 1 (gas natural)	1.9285	30.857
Total corriente 2 (lodos)	1036.80	7200.00
Total corriente 3 (aire)	2044.22	59241.49
TOTAL	3082.95	66472.36

III.1.2. Datos de las corrientes de salida

Por otro lado, una vez calculadas las corrientes de entrada se pueden calcular por balance de materia las corrientes de salida.

Primero se calcula la corriente de escorias o cenizas, ya que según el estudio de donde se han estimado las composiciones de los lodos, en ellas se establece que los lodos tienen un 40% del total perteneciente a cenizas, por tanto, se aplica la siguiente ecuación:

$$\text{Corriente 5 (cenizas)} = \frac{\text{Total corriente Residuo} \cdot \% \text{ cenizas residuo}}{100}$$

Igual que, una vez calculada la corriente 5, se puede calcular la corriente 4 de la siguiente manera:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas}$$

$$C1 + C2 + C3 = C4 + C5$$

III. Desarrollo proyecto

Como se conocen todas las corrientes menos la corriente 4, esta se despeja y por tanto los resultados de dichas corrientes mencionadas se muestran en la siguiente tabla (Tabla 8).

Tabla 8. Características de las corrientes de Salida.

SALIDAS	kmoles/hora	kg/hora
Total corriente 4 gases combustión (60%)	2661.60	63546.28
Total corriente 5 cenizas (40% del residuo)	421.36	2926.08
TOTAL	3082.95	66472.36

Analizando los datos de las corrientes de salida, se puede observar cómo los gases de combustión tienen mayor proporción de materia que las cenizas y esto se debe a que al ser un proceso de incineración, la mayoría de los compuestos se volatilizan, pero no se llegan a quemar, solo se calcinan el 40% de los compuestos, lo cual implica que el horno trabaja a una temperatura adecuada. Además, los gases de combustión serán necesarios para producir energía eléctrica por lo que es interesante que un 60% este en forma de gas.

III.1.3. Balance de Materia

III.1.3.1. Cálculo de los gases de combustión

Una vez calculado los datos de la corriente de aire ya se puede determinar la composición de los gases de combustión. Los productos que se dan en la combustión son los de las reacciones mencionadas anteriormente en el proceso del cálculo del aire, más las siguientes reacciones la cuales da lugar a monóxido de carbono y ácido clorhídrico.

- $C + 0.5 O_2 \rightarrow CO$ (5)
- $Cl_2 + H_2 \rightarrow 2 HCl$

Las emisiones gaseosas están consideradas como la principal fuente de contaminación que puede tener una planta incineradora. Los agentes contaminantes principales en estas corrientes de gases formados en la combustión suelen ser óxidos de nitrógeno, dióxidos de azufre, óxidos de carbono, metales pesados, sustancias orgánicas, etc. Por ello hay que implementar sistemas para el tratamiento de dichos gases denominados TGC (Tratamiento de gases de combustión). Este sistema se compone de

III. Desarrollo proyecto

varios equipos de tratamiento individual, ya que no hay técnicas que depuran varios contaminantes a la vez.

Durante la combustión se debe tener en cuenta tanto las entradas como las salidas y conocer la composición química de las corrientes, ya que a partir del proceso de combustión se generan gases conocidos como gases de combustión, que por lo general son monóxido de carbono y monóxido de nitrógeno, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno, agua, dióxido de carbono, etc. Aunque estos gases generados pueden variar su cantidad dependiendo de las composiciones de entrada y cuales sean los elementos de dichas corrientes los mayoritarios.

En este caso el agua se introduce a partir del residuo y en la corriente de aire ya que es aire húmedo. Para determinar la cantidad de agua introducida con el aire se deben especificar ciertos datos característicos del aire en la zona de Alicante (Tabla 9). Seguidamente se calcula los kg de agua por hora y luego se pasan a kmol de agua por hora.

Tabla 9. Datos característicos del aire en la zona de trabajo.

HUMEDAD RELATIVA ALICANTE	0.66	-
TEMPERATURA MEDIA ALICANTE	14.8	°C
HUMEDAD ESPECIFICA	0.09	-

$$H_2O = \text{aire real necesario (Tabla 6)} \cdot H_{\text{específica}}$$

$$H_2O = 59241.5 \frac{\text{kg aire seco}}{\text{h}} \cdot 0.09 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg aire seco}} = 5331.7 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$H_2O = \frac{5331.7 \frac{\text{kg agua}}{\text{h}}}{PM_{\text{agua}}} = \frac{5331.7 \frac{\text{kg agua}}{\text{h}}}{18 \frac{\text{kg agua}}{\text{kmol agua}}} = 296.2 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

Por tanto, se obtendrán 296.2 kmol por hora de H₂O introducidos en la corriente de aire. Por otro lado, para conocer el agua que se introduce en la corriente de residuo, se estima que todo el hidrógeno en el proceso de combustión se convierta en agua, por tanto, se formarán 9872.0 kmol por hora de agua. Además, las cenizas también contienen cierto porcentaje de agua ya que están húmedas, en este caso hay un 15% de humedad en las cenizas, por tanto, solo hay que multiplicar la cantidad total de la corriente 5

III. Desarrollo proyecto

(cenizas) por el 15%, el cual da 63.20 kmol/h. Finalmente el agua total que sale en forma de vapor, debido a la combustión es la suma, es decir 10231.40 kmol por hora.

Por otro lado, también hay que añadir a los gases de salida los NO_x (NO y NO₂) formados que provienen principalmente de la oxidación del N presente en el combustible y de la oxidación del nitrógeno en el aire. Para ello, primero hay que conocer el nitrógeno total introducido, en este caso el nitrógeno se introduce tanto por la corriente de aire de entrada y mediante la entrada de lodos, por un lado, ya se conoce la cantidad de nitrógeno que proviene del residuo y está definido en la Tabla 3, es decir, 28.79 kmol de nitrógeno/h, por otro lado, se sabe que la proporción de nitrógeno en el aire es de 79%, por tanto se calculará de la siguiente forma:

$$N(\text{aire}) = F3(\text{aire}) \left(\frac{\text{kmol}}{\text{h}} \right) \cdot 79\% \text{ nitrógeno} = 2044.22 \cdot 0.79 = 1614.90 \text{ kmol/h}$$

Una vez calculado el nitrógeno, obtenemos una cantidad de nitrógeno total a la entrada de 1643.70 kmol/h. Según proyectos, 1 m³ de nitrógeno equivalen a 400 mg de nitrógeno. Por tanto, hay que pasar estos kilomoles a m³, y para ello se hará servir la hipótesis de Avogadro, donde 1 mol de gas ocupa 22.4 m³ en unas condiciones normales de 0°C y 1 atm.

$$m^3 \text{ Nitrogeno} = 1614.90 \text{ kmol} \cdot 22.4 \frac{m^3}{\text{kmol}} = 36819.30 m^3 \text{ Nitrogeno}$$

$$mg \text{ Nitrogeno totales} = \frac{36819.30 m^3 \cdot 400 mg}{1 m^3} = 14727738.70 mg$$

→ 14.73 kg Nitrogeno

Por tanto, en las corrientes de entrada hay un total de 14.73 kg de nitrógeno por hora, lo cual esta cantidad de nitrógeno puede que disminuya o sea igual en la salida, pero en forma de gas debido a que el nitrógeno se oxidará en presencia del oxígeno y se formará monóxido de nitrógeno (NO) o dióxido de nitrógeno (NO₂).

En el documento sobre las Mejoras Técnicas Disponibles se establecen unos valores de salida de la caldera entre 20 - 180 mg/m³, por tanto en este estudio se ha estimado unos 160 mg/m³. Con ello, la cantidad de NO supone un 95% del nitrógeno total, lo que significa una cantidad de 13.99 kg/h y el 5% restante se transforma en NO₂, que son 0.74 kg/h.

III. Desarrollo proyecto

A continuación, también se estudiará la entrada de carbono, el cuál proviene tanto del residuo como de la entrada de combustible (metano). Por tanto, se calculan los kmoles de C de estas dos corrientes para conocer la cantidad total de C que entra al proceso. En la Tabla 3 ya tenemos la cantidad de C que entra por la corriente del residuo, por esta razón solo se calcula:

$$C (\text{metano}) = \frac{\text{mol } CH_4 \cdot PM C}{PM CH_4} = \frac{1.929 \frac{\text{kmol}}{h} \cdot 12 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{16 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 1.4 \frac{\text{kmol } C}{h}$$

$$C (\text{total entrada}) = C (\text{metano}) + C (\text{residuo}) = 1.4 \frac{\text{kmol}}{h} + 293.84 \frac{\text{kmol}}{h} = 295.28 \frac{\text{kmol}}{h}$$

$$C (\text{total entrada}) = 295.28 \frac{\text{kmol}}{h} \cdot 12 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} = 3543.41 \frac{\text{kg}}{h}$$

Una vez calculado el carbono total, se ha de tener en cuenta que no todo el carbono reacciona, sino que parte de este sale con las cenizas como inquemado. Como no se ha encontrado ningún dato que especifique el porcentaje de carbono total que se queda en las cenizas, se ha considerado que este carbono inquemado es COT (carbono orgánico total). Por tanto, según el BREF, para un horno de lecho fluidizado, hay un estudio de datos químico de una planta incineradora de residuos de Spittelau, donde el porcentaje de carbono orgánico total en las escorias está entre 1-2.8% y en las cenizas volantes entre 0.8-2.5%. Por lo que, en este caso, se estima que el porcentaje de carbón en las escorias es de 2.75 % y el porcentaje de carbón en las cenizas volantes de manera estimada es de 0.97%.

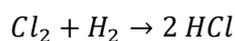
Además, también hay que considerar que el carbono durante la combustión reacciona y da lugar a monóxido de carbono y dióxido de carbono. Según estudios, aproximadamente el 7% del carbono total se convierte en CO y el 93% en CO₂. Hay más dióxido de carbono que de monóxido, ya que como existe un exceso de aire, provoca que el compuesto mayoritario de la reacción sea el que está más oxidado. Para conocer en nuestro caso cuanto carbono se convierte en CO y cuanto en CO₂ se realizan los siguientes cálculos:

$$\text{Carbono en forma de CO} = (1 - \% \text{ Carbono (escorias)} - \% \text{ Carbono (cenizas)}) \cdot 0.07$$

$$\text{Carbono en forma de CO}_2 = (1 - \% \text{ Carbono (escorias)} - \% \text{ Carbono (cenizas)}) \cdot 0.93$$

III. Desarrollo proyecto

Con respecto al HCl, en este estudio, este producto depende directamente de la cantidad que entre con el residuo y si este esté en proporciones bajas, la cantidad de HCl en forma de gas también lo será. Además, la formación del HCl depende la reacción siguiente y por tanto la cantidad del residuo de Cl va a ir ligada con la estequiometría de la reacción, es decir por cada molécula de Cloro se forman 2 de HCl.



A continuación, la siguiente tabla (Tabla 10) resume los principales gases de combustión generados:

Tabla 10. Concentración de los gases de combustión.

GASES	kg/hora
CO	557.23
SO ₂	234.17
HCl	45.62
O ₂	1144.76
N ₂	46800.78
H ₂ O	568.41
NO	13.99
NO ₂	0.74
CO ₂	14180.58
Total	63546.28

III.1.3.2. Cálculo de los reactivos para el tratamiento de los gases de salida

Como bien se ha dicho en el apartado anterior, las emisiones de los gases de salida tienen que ser tratadas para que cumplan con los límites establecidos por la normativa europea. La aplicación de estas normativas ha reducido las emisiones a la atmósfera a niveles en los cuales los riesgos contaminantes de las incineradoras de residuos se consideran generalmente muy bajos. El uso de técnicas para controlar las emisiones a la atmósfera es un aspecto clave medioambiental. Las técnicas que más se utilizan son:

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

III. Desarrollo proyecto

Una adecuada selección y combinación de dichas técnicas para la corriente de salida de los gases de combustión permiten diseñar un sistema de depuración apropiado para cumplir con los límites de emisión planteados por la Directiva 2000/76/CE. En la Tabla 11, se muestran los límites establecidos en varios países y de Europa. [10]

Tabla 11. Emisiones establecidas en diferentes países. [11]

Regulación de emisiones		EU	China	Japón	Corea
Contaminante	Unidades				
CO	mg/Nm ³ *	50		150	50
SO ₂	mg/Nm ³	50			30
NO _x	mg/Nm ³	200	400	250	80
HF	mg/Nm ³	1			
HCl	mg/Nm ³	10	75		30
Partículas	mg/Nm ³	10	80	40	30
Dioxinas y Furanos	mg/Nm ³	0.1	1	0.1	0.1
Hg	mg/Nm ³	0.05	0.2		0.1
Cd+Ti	mg/Nm ³	0.05	0.1		0.02
Otros metales	mg/Nm ³	0.5			1.6
VOC	mg/Nm ³	10			

* (mg/Nm³) = mg por nanómetro cúbico que se emite a la atmósfera.

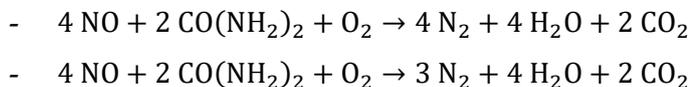
A continuación, hay que calcular la cantidad necesaria de los reactivos, que en este caso son la urea para el tratamiento de los NO_x, la cal hidratada para la eliminación de los compuestos ácidos como son el SO₂ y el HCl, y el carbón activo como reactivo final para la adsorción de dioxinas y furanos y mercurio.

III.1.3.2.1. Cálculos para reducir los NO_x

En primer lugar, para el tratamiento de reducir los NO_x se aplicará un tratamiento de reducción no catalítica selectiva (RNCS). Este tratamiento consiste en inyectar urea dentro de una caldera o en ductos. Además, está basado en la ionización de la urea mediante la temperatura en vez de usar un catalizador o plasma térmico. La

III. Desarrollo proyecto

temperatura esta entre unos 900°C y 1100°C. Por tanto, se calcula el caudal de urea necesario para tratar la corriente de los NO_x. La reacción que tiene lugar entre la urea y los NO_x son:



Donde se considera que el rendimiento de las reacciones es de un 75% y según estudios hay que tener un exceso de reactivo de 1.5, ya que ambos parámetros suelen estar relacionados [12] [13]. Una vez ya tratada la corriente que finalmente saldrán los gases de NO_x a la atmosfera, el documento BREF, establece unos valores máximos de emisión permitidos de 200 mg/Nm³.

A continuación, se calculará la cantidad de urea que hace falta para poder reducir las emisiones de los NO_x en la salida de la combustión, en la Tabla 12 se muestran todos los reactivos y productos a la entrada y a la salida después de que se hayan tratado con urea.

Tabla 12. Reactivos y productos en el tratamiento de urea.

GASES	Salida de combustión (antes de tratar con urea)	Después de tratar
	kg/hora	kg/hora
NO	13.99	3.498
NO ₂	0.74	0.184
CO(NH ₂) ₂	22.09	8.930
O ₂	1144.76	1143.026
N ₂	46800.78	46807.649
H ₂ O	568.41	577.381
CO ₂	14180.58	14191.541

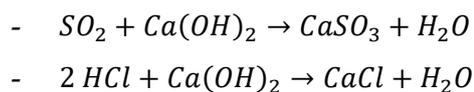
El caudal necesario para poder realizar el tratamiento es de 64.29 tn/año, como la urea se inyecta en solución acuosa al 50% en peso, finalmente serán necesarios 71.44 tn/año de agua. Además, si observamos las emisiones de los NO_x, se ve efectivamente que se reduce mucho más de la mitad de lo que sale de la caldera de combustión. Asimismo, se observa que las concentraciones de los NO_x no son muy elevadas a la salida de la combustión y esto puede estar relacionado con la cantidad de aire que se inyecta para el proceso de combustión o también podría deberse a que los lodos en su composición tienen un valor de nitrógeno muy pequeño.

III. Desarrollo proyecto

III.1.3.2.2. Cálculos para tratar los gases ácidos (SO₂ y HCl)

Seguidamente, se deben tratar los gases ácidos (SO₂ y HCl) y para ello existen tres técnicas de eliminación de dichos gases que son: los sistemas húmedos, semihúmedos o semisecos y secos. En este caso se ha elegido un sistema semihúmedo con recirculación, que consiste en la absorción por pulverización, donde el agente de absorción se inyecta en forma de suspensión o solución en el flujo de gas de combustión caliente en un reactor de pulverización. Además, los productos generados de las reacciones deben ser separados del gas de combustión en forma de polvo, por ello se utilizará un filtro de tejido. [1]

Este sistema se ha elegido, ya que minimiza el consumo energético más que los otros sistemas. En cuanto al reactivo que se utilizará en este tratamiento es la cal hidratada y las reacciones que se producirán serán las siguientes:



Esta técnica de sistema semihúmedo puede alcanzar hasta un rendimiento de eliminación entre un 92 y 98% para el SO₂ y a partir de 95% para el HCl, por tanto, se ha estimado un valor de 93% para el tratamiento de ambos gases. Además, el reactivo debe de estar en exceso para asegurarse de que los gases se eliminen y no contaminen la atmosfera, por tanto se ha elegido un exceso de 1.5 de cal hidratada, tal y como dicta el documento BREF. [14] [1]

A continuación, se muestran en la Tabla 13, las corrientes implicadas en este tratamiento con sus reactivos necesarios y sus productos generados antes y después del tratamiento.

Tabla 13. Reactivos y productos del tratamiento de los gases ácidos.

	Salida de combustión (antes de tratar con cal)	Después de tratar
GASES	kg/hora	kg/hora
HCl	45.62	3.19
SO ₂	234.17	16.39
Ca(OH) ₂	13989.40	13764.95
CaSO ₃	-	439.68
CaCl ₂	-	68.82
H ₂ O	568.41	665.76

III. Desarrollo proyecto

En este caso, para saber cuánta cal hidratada se ha utilizado, se ha calculado de la siguiente manera:

$$\text{Cal necesaria } \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right) = \text{Ca(OH)}_2 \text{ despues de tratar } \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right) \cdot \text{residuos tratados } \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right)$$

Finalmente, la cantidad de cal hidratada que se necesita en el tratamiento es 2412.85 tn/año, la cual se encuentra diluida 5 veces en agua. La cantidad de cal que reacciona es 4.28 kg por tonelada de residuo alimentado a la planta, lo cual se encuentra por debajo del rango entra 6 y 22 kg/tn de lodos que se dicta en el BREF.

Si se analizan los datos de la Tabla 13, se observa que se necesita una cantidad elevada de cal, esto no debería ser de tal manera ya que el porcentaje de azufre y de cloro en la composición de los lodos más pequeña que de lo habitual. La única manera de razonar por qué se necesita una cantidad de cal tan alta es que el sistema de tratamiento no sea tan eficaz como podrían ser otros, pero se ha priorizado tener un sistema que sea económico y eficiente a la vez.

III.1.3.2.3. Cálculos para tratar los gases con carbón activo

En tercer lugar, se realizará un tratamiento con carbón activo para la reducción de emisiones de metales pesados. Esta técnica se utiliza sobre todo para el mercurio, ya que es muy volátil y tóxico. El valor límite fijado en la directiva sobre incineración de residuos es de 0.05 mg/m³. La tecnología de carbón activo que se va a emplear es la “B&W Powered Activated Carbon (PAC)”, la cual se comercializa desde mediados de los años 90. Una de las características más importantes de esta tecnología, es que tiene una eficacia de eliminación de hasta un 96%. [11]

Por tanto, se ha de calcular la cantidad necesaria de carbón activo, pero se desconoce la composición de entrada de Hg en los lodos. No obstante, no ha sido necesario ya que, según el BREF, se indica que se necesita una cantidad de carbón activo entre 0.35 y 3 kg por tonelada de residuo incinerado. Por ello, se estima que se necesita una cantidad de carbón activo de 1.5, lo que implica que para nuestra cantidad de lodos se necesitarán 86400 kg/año de carbón activo por cada reactor.

Finalmente, cabe destacar que las concentraciones de los contaminantes emitidos a la atmosfera están referidas a un porcentaje de salida oxígeno de la planta de un

III. Desarrollo proyecto

0.018%, mientras que los valores límites europeos (VLE) están referidos a un 11% de oxígeno por lo que hay que convertir nuestros valores a los de VLE para poder compararlo y ver si realmente se cumple con la normativa. La directiva 2000/76/CE, facilita una fórmula para referir los valores al 11% de oxígeno.

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

Donde,

E_S = concentración de emisiones calculada en la concentración porcentual normal de oxígeno.

E_M = medición de la concentración de emisiones

O_S = concentración normal de oxígeno

O_M = medición de la concentración de oxígeno

Tabla 14. Gases emitidos a la atmósfera.

Gases totales emitidos tras tratamientos				
Contaminante	kg/h	mg/Nm ³	mg/Nm ³ (11%)	VLE (mg/Nm ³)
NOx	3.6819	4.80576E-07	2.29042E-07	200
HCl	3.1935	4.16827E-07	1.98659E-07	10
SO ₂	16.392	2.13948E-06	1.01968E-06	50
CO	557.23	7.27309E-05	3.46635E-05	50
Compuesto	kg/h	%v/v		
O ₂	1143.0	0.0180		
N ₂	46808	0.7384		
Compuesto	kg/h	%p/p		
H ₂ O	665.76	-		

En la Tabla 14, se muestran las emisiones de los gases con la forma regulada a 11% de oxígeno. Con ello se puede observar que efectivamente la cantidad de los gases que se emiten son infinitamente pequeñas, por lo que la planta de incineración y sus tratamientos funcionan correctamente y provocan que haya un margen considerable en las emisiones por si algún día los lodos que se tratan están más contaminados de lo normal.

III. Desarrollo proyecto

Además, después del tratamiento a la que se somete la corriente de los gases, debido a las reacciones con la urea, la cal y el carbón activo, se generan sólidos que se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Sólidos generados durante el tratamiento de los gases de combustión.

sólidos	kg/hora
CO(NH ₂) ₂	8.9
Ca(OH) ₂	335.1
CaSO ₃	439.7
CaCl ₂	68.8

III.1.3.3. Cálculo de los residuos sólidos producidos

A continuación, se van a calcular cual es la composición química de las cenizas y escorias. Debido al proceso de combustión, se van a quedar cenizas que se pueden dividir en cenizas de fondo o escorias y cenizas volantes. La estructura química de la ceniza varía en función de donde provengan los lodos que se han tratado, es decir los lodos que provienen de zonas industriales pueden contener una concentración alta en metales pesados los cuales terminan acumulándose en las cenizas, sin embargo, si los lodos provienen de zonas rurales, el lodo es más limpio y por tanto tiene un menor índice de contaminación en las cenizas. En este proyecto, los lodos provienen tanto de la industria como de zonas rurales, ya que se ha hecho un promedio de un estudio donde se tratan 6 tipos de lodos, por tanto habrá una gran disparidad entre la composición de metales pesados en las cenizas que se formen.

En primer lugar, se va a definir la composición química de los metales pesados de la entrada de lodos en la incineradora (Tabla 16).

III. Desarrollo proyecto

Tabla 16. Composición química de los compuestos minoritarios del lodo de depuradora tratado.

	composición minoritarios (mg/kg)	proporción en %	g totales entrada	kg totales entrada
Zn	153	25.05	1098	1.098
V	1.90	0.31	13.68	0.014
Cr	309	50.77	2226	2.226
Co	0.40	0.07	2.880	0.003
As	0.60	0.10	4.320	0.004
Mn	33.7	5.53	242.6	0.243
Cd	0.30	0.05	2.160	0.002
Sb	2.60	0.43	18.72	0.019
Hg	1.40	0.23	10.08	0.010
Cu	99.8	16.39	718.5	0.719
Pb	1.40	0.23	10.08	0.010
Ti	0.10	0.02	0.720	0.001
Ni	5.00	0.82	36.00	0.036
Total	609	100	4383	4.383

Analizando los datos se puede observar que, respecto a la concentración de los metales pesados, no poseen concentraciones elevadas con respecto a la cantidad de lodo que se trata al día, por tanto, los residuos sólidos que se puedan formar durante la combustión no serán en concentraciones altas y en consecuencia las cenizas serán poco contaminantes para el medio ambiente.

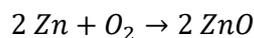
A continuación, se calculará la cantidad de cenizas totales que se generan, es decir tanto en forma de cenizas volantes como en escorias. Como se muestra en la Tabla 3 el lodo a la entrada contiene un 40% en su total de cenizas, por tanto si a la hora entran 7200 kg de lodos el 40%, equivale a 2926 kg de cenizas totales en el lodo. Según el BREF, en un horno de lecho fluidizado, las cenizas volantes pueden llegar hasta un 90% con respecto a las cenizas totales, por tanto se ha estimado que en este caso el 85% del total sean cenizas volantes, es decir que 2487 kg/h equivalen a las cenizas volantes que se generan y lo restante serían las escorias. En la Tabla 17 se muestran todos los datos.

III. Desarrollo proyecto

Tabla 17. Cantidad de cenizas totales, volantes y escorias.

cenizas totales	2926.08	kg/hora
	23408.64	tn/año
(cenizas volantes el 85%)	0.85	Hasta un 90 %
cenizas volantes totales	2487.17	kg/hora
	19897.34	tn/año
escorias del horno	438.91	kg/hora
	3511.30	tn/año

Una vez conocida la cantidad de cenizas totales que se generan, se va a estudiar cual es la composición química de estas después del proceso de combustión donde la mayoría de los metales pesados se oxidan debido al exceso de oxígeno que existe. Así pues, como las escorias equivalen a un 15 % de las cenizas totales, se calcula para cada elemento cuanta cantidad hay en forma de escoria. En este caso, primero se calcula la cantidad en mg/kg, para conocer el porcentaje de los elementos presentes en la escoria y a continuación calcular en kg/año. Por ejemplo, en el caso del zinc, este reacciona de la siguiente manera:



La cantidad que se genera de óxido de zinc es la siguiente:

$$\text{ZnO} = \frac{152.52 \cdot 15\%}{100\%} = 22.88 \frac{\text{mg ZnO}}{\text{kg lodo}}$$

Esto para pasarlo al porcentaje que equivale del total de escorias, se debe calcular con todos los elementos que se formen para conocer la suma de mg/kg que hay en las escorias. Esto equivale a 92.21 mg/kg, por tanto:

$$\text{ZnO} = \frac{22.88 \frac{\text{mg ZnO}}{\text{kg lodo}}}{92.21 \text{ mg/kg}} \cdot 100\% = 24.81\%$$

A partir del porcentaje y el total en kg/h de escorias se puede calcular para cada elemento la cantidad que se forma, es decir:

$$\text{ZnO} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 24.81\% \cdot 438.91 \text{ kg/h} = 108.88$$

III. Desarrollo proyecto

Por otro lado, según el BREF, se conoce que el carbono total de los lodos, no se transforma en gas en su totalidad, entre un 1 y un 2.5% del carbono se queda en los residuos sólidos, concretamente en las escorias, por tanto se ha estimado que un 0.97% del carbono que entra por el lodo un parte pasa a las escorias. Así pues, para conocer la cantidad de carbono que se ha quedado en las cenizas de fondo o escorias se ha realizado en siguiente calculo:

$$C \left(\frac{kg}{h} \right) = 0.97\% \cdot 438.91 \text{ kg/h} = 4.26$$

Finalmente, los datos de todos los elementos, se resume en la Tabla 18, donde los demás compuestos se ha seguido la misma metodología de cálculo como la que se ha explicado con el zinc.

Tabla 18. Composición química de residuos sólidos en las escorias.

	mg/kg	% presente en escoria	tn/año	kg/hora escoria
ZnO	22.88	24.81%	871.06	108.88
V₂O₅	0.29	0.31%	10.85	1.36
Cr₂O₃	46.37	50.28%	1765.55	220.69
CoO	0.06	0.07%	2.28	0.29
As₂O₅	0.09	0.10%	3.43	0.43
MnO₂	5.06	5.48%	192.49	24.06
CdO	0.05	0.05%	1.71	0.21
Sb₂O₃	0.39	0.42%	14.85	1.86
HgO	0.21	0.23%	8.00	1.00
CuO	14.97	16.23%	570.05	71.26
PbO₂	0.21	0.23%	8.00	1.00
TiO₂	0.02	0.02%	0.57	0.07
Ni₂O₃	0.75	0.81%	28.56	3.57
Carbono inquemado	0.89	0.97%	34.06	4.26
Total	92.21	100.00%	3511.46	438.93

A continuación, en la Tabla 19 se indican las reacciones de oxidación de los metales pesados debido al exceso de aire, por lo que los productos estarán en su forma más oxidada:

III. Desarrollo proyecto

Tabla 19. Reacciones de oxidación de los metales pesados.

Metal pesado	Reacción oxidación
Zn	$2 Zn + O_2 \rightarrow 2 ZnO$
V	$5 V + \frac{5}{2} O_2 \rightarrow V_2O_5$
Cr	$4 Cr + 3 O_2 \rightarrow 2 Cr_2O_3$
Co	$4 Co + 3 O_2 \rightarrow 2 Co_2O_3$
As	$2 As + \frac{5}{2} O_2 \rightarrow As_2O_5$
Mn	$Mn + O_2 \rightarrow MnO_2$
Cd	$2 Cd + O_2 \rightarrow 2 CdO$
Sb	$4 Sb + 3 O_2 \rightarrow 2 Sb_2O_3$
Hg	$2 Hg + O_2 \rightarrow 2 HgO$
Cu	$2 Cu + O_2 \rightarrow 2 CuO$
Pb	$Pb + O_2 \rightarrow PbO_2$
Ti	$Ti + O_2 \rightarrow TiO_2$
Ni	$2 Ni + O_2 \rightarrow 2 NiO$

Por otro lado, la composición de las cenizas volantes se calcula de manera similar a como se ha hecho con las escorias. En este caso, un 85 % del total de las cenizas pertenece a cenizas volantes. Para ello se calcula cuanto hay en mg/kg por cada elemento aplicando la siguiente ecuación, como ejemplo ponemos el zinc:

$$ZnO = \frac{152.5 \text{ mg Zn}}{\text{kg}} \text{ totales} - 22.88 \frac{\text{mg Zn}}{\text{kg}} \text{ escorias} = \frac{129.63 \text{ mg}}{\text{kg}} \text{ cenizas volantes en ZnO}$$

Seguidamente se calcula el porcentaje por cada elemento que está presente en las cenizas volantes, por tanto se calcula la cantidad total en mg/kg de todos los elementos, estos cálculos serían de la siguiente manera:

$$\% ZnO (\text{cenizas volantes}) = \frac{\frac{129.63 \text{ mg}}{\text{kg}} ZnO}{\frac{532.11 \text{ mg}}{\text{kg}} \text{ totales}} \cdot 100\% = 24.36 \%$$

Finalmente, se conoce la cantidad total de cenizas volantes totales en kg/h que se producen, por tanto se calcula cuanta cantidad hay por cada elemento y como afecta esta proporción:

III. Desarrollo proyecto

$$ZnO \left(\frac{kg}{h} \right) = cenizas\ volantes\ totales \cdot \% (ZnO) = 2847.17 \left(\frac{kg}{h} \right) \cdot 24.36\% = 605.88 \frac{kg}{h}$$

Por otro lado, como bien sucede en las escorias, en las cenizas volantes también se queda una proporción de carbono que no se ha conseguido quemar en la combustión, por tanto, según el BREF, para un horno de lecho fluidizado, el porcentaje de carbono que se queda en las cenizas volantes suele ser entre un 0.8 % hasta un 2.5%, por tanto se estima que en este caso, el porcentaje de carbono inquemado sea de un 0.97%.

En la siguiente Tabla 20 se resumen los resultados de seguir los cálculos anteriores por cada elemento:

Tabla 20. Composición química de residuos sólidos en las cenizas volantes.

	mg/kg	% presente en cenizas volantes	tn/año	kg/hora cenizas volantes
ZnO	129.63	24.36%	4847.08	605.88
V ₂ O ₅	1.62	0.30%	60.39	7.55
Cr ₂ O ₃	262.74	49.38%	9824.47	1228.06
CoO	0.34	0.06%	12.71	1.59
As ₂ O ₅	0.51	0.10%	19.07	2.38
MnO ₂	28.65	5.38%	1071.12	133.89
CdO	0.26	0.05%	9.54	1.19
Sb ₂ O ₃	2.21	0.42%	82.64	10.33
HgO	1.19	0.22%	44.50	5.56
CuO	84.83	15.94%	3172.05	396.51
PbO ₂	1.19	0.22%	44.50	5.56
TiO ₂	0.09	0.02%	3.18	0.40
Ni ₂ O ₃	4.25	0.80%	158.92	19.87
Carbono inquemado	14.63	2.75%	547.18	68.40
Total	532.11	100.00%	19897.35	2487.17

Analizando los resultados obtenidos se puede observar que la mayoría de las cenizas están compuestas de óxido de zinc, óxido de cromo III, óxido de cobre y óxido de manganeso, igual que sucede que en las escorias. La cantidad final que sale en forma de cenizas no es muy elevada, por tanto, no hay un índice de contaminación alto.

III. Desarrollo proyecto

III.1.4. Balance de Energía

En este apartado se van a especificar los cálculos realizados para conocer la energía eléctrica que se va a generar por cada reactor de la planta, por lo que el total de las energías se tendrá que multiplicar por cada reactor que haya, es decir 5 reactores.

III.1.4.1. Energía aportada en el proceso

Primeramente, hay que calcular la energía total suministrada tanto por los lodos, como por el aire y el combustible auxiliar, en este caso el gas natural. Por tanto, para empezar, se va a calcular la cantidad de energía aportada por el combustible, es decir los lodos que se van a incinerar:

$$E_{comb} \left(\frac{MJ}{año} \right) = PCl \left(\frac{MJ}{kg} \right) \cdot M_{comb} \left(\frac{kg \text{ residuo}}{h} \right) \cdot tiempo \text{ operativa}$$

$$E_{comb} = 15.65 \frac{MJ}{kg} \cdot 7200 \frac{kg \text{ residuo}}{h} \cdot 8000 h = 901\,440\,000 \frac{MJ}{año}$$

Por lo que, la cantidad de energía generada por los lodos es de 901 440 GJ/año.

Seguidamente, se calculará la cantidad de energía aportada por la corriente de aire introducido necesario para la combustión. Para ello se va a introducir el aire a 150°C. El cálculo para conocer la cantidad de energía suministrada es el siguiente:

$$E_{aire} \left(\frac{kJ}{año} \right) = h_{aire \text{ húmedo } 150^{\circ}C} \left(\frac{kJ}{kg} \right) \cdot Aire \text{ real necesario} \left(\frac{kg}{año} \right)$$

$$E_{aire} = 337.39 \frac{kJ}{kg} \cdot 473931990 \frac{kg}{año} = 159\,899\,914\,140 \frac{kJ}{año}$$

Por tanto, la energía generada por el aire es 159 900 GJ/año.

Finalmente, se calculará la energía aportada por el combustible auxiliar, en este caso gas natural, como ya se ha comentado anteriormente. Para ello, según el documento BREF, para incinerar una tonelada de residuo se necesitan entre 4.5 y 20 m³/tn residuo. Por tanto, se ha supuesto que harán falta 6 m³ de gas natural necesarios por tonelada de residuo a incinerar. El cálculo para conocer la energía aportada es:

$$E_{Gas \text{ Natural}} = 6 \left(\frac{m^3}{tn \text{ residuo}} \right) \cdot M_{comb} \left(\frac{tn \text{ residuo}}{año} \right) \cdot PCl_{Gas \text{ natural}} \left(\frac{GJ}{m^3} \right)$$

III. Desarrollo proyecto

$$E_{Gas\ Natural} = 6 \frac{m^3}{tn\ residuo} \cdot 57600 \frac{tn\ residuo}{año} \cdot 0.038 \frac{GJ}{m^3} = 13132.8 \frac{GJ}{año}$$

Por tanto, se generan 13132.8 GJ/año por parte del gas natural. Además, el consumo de gas natural en este proceso son 345 600 m³/año.

Una vez calculadas dichas energías, se puede conocer cuál es la energía total producida en el horno, la cual es la suma de estas 3 calculadas anteriormente. Por tanto, la energía total que se produce en el horno durante el proceso de combustión es 1 074 472 GJ/año. Sin embargo, esta energía no va a ser 100% energía útil, ya que se producen pérdidas por pérdidas de calor en la combustión o por perdidas de calor en las cenizas volantes y escorias.

III.1.4.2. Pérdidas de energía del proceso

Por lo que se deberán calcular estas pérdidas de calor para conocer realmente cual es la energía que se genera durante el proceso y así poder aprovecharla y convertirla en energía eléctrica. En primer lugar, se calculará las pérdidas de calor por combustión, por tanto, los cálculos son los siguientes:

$$E_x \left(\frac{KJ}{año} \right) = Cp_x \left(\frac{KJ}{kg \cdot K} \right) \cdot (T_{gases}(K) - T_{ambiente}(K)) \cdot M_x \left(\frac{kg}{año} \right)$$

En este caso, esta fórmula se aplicará a cada uno de los gases de combustión, como la planta incineradora trabaja a 850°C, por tal razón la temperatura de salida de los gases será 850°C. En la Tabla 21 se especifican todas las características energéticas de los gases

Tabla 21. Características energéticas de los gases de combustión.

GASES	Cp (kJ/kg·K)	H-H ₀	kg/h	kg/año
CO	1.05	162.8	557.23	4457817.49
CO ₂	0.85	131.1	14181	113444608
H ₂ O	1.87	290.4	568.41	4547276.76
N ₂	1.04	161.1	46801	374406272
SO ₂	0.6	93.2	234.17	1873331.05
HCl	0.99	154.1	45.622	364973.686
O ₂	0.92	142.0	1144.8	9158106.09

Para calcular la masa en kg/año solo hace falta multiplicar los kg/h por las horas operativas anuales que funciona la planta. Los datos de la capacidad calorífica de los

III. Desarrollo proyecto

gases se han sacado del NIST, como también la entalpía la cual se calcula con la siguiente fórmula: $H^\circ - H^\circ_{298.15} = A \cdot t + B \cdot t^2/2 + C \cdot t^3/3 + D \cdot t^4/4 - E/t + F - H$.

A continuación, con todos los datos especificados, ya se puede calcular la energía aportada por cada gas de combustión, donde los resultados se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22. Energía por perdidas de combustión de los gases.

GASES	GJ/año
CO	3861.58
CO ₂	79553.0
H ₂ O	7015.31
N ₂	321241
SO ₂	927.299
HCl	298.092
O ₂	6951.00

Para pasar la energía de KJ/año a GJ/año se tiene que dividir entre 10⁶. En total, la energía que se pierde por los gases de combustión es 419 847 GJ/año, es decir casi la energía total que se genera en el horno.

En segundo lugar, se calcularán las pérdidas de calor que se producen en las cenizas volantes y las escorias. En este caso, tanto las escorias como las cenizas volantes saldrán a 850°C, ya que un horno de lecho fluidizado trabaja a esta temperatura y a la salida será la misma temperatura a la que trabaja el horno. Para conocer la energía pérdida de las cenizas y las escorias se aplican las siguientes ecuaciones:

$$E_{i,escorias} \left(\frac{KJ}{año} \right) =$$

$$Cp_i \left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right) \cdot \left(M_{i,escorias} \left(\frac{kg}{h} \right) \cdot Tiempo\ operativo \left(\frac{h}{año} \right) \right) \left(\frac{Kg}{año} \right)$$

$$\cdot (T_{escorias} - T_{ambiente})(K)$$

$$E_{i,cenizas} \left(\frac{KJ}{año} \right) =$$

$$Cp_i \left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right) \cdot \left(M_{i,escorias} \left(\frac{kg}{h} \right) \cdot Tiempo\ operativo \left(\frac{h}{año} \right) \right) \left(\frac{Kg}{año} \right)$$

$$\cdot (T_{escorias} - T_{ambiente})(K)$$

III. Desarrollo proyecto

Donde, i , se refiere al compuesto que se está calculando, es este caso serán los componentes minoritarios de la planta y el tiempo operativo son 8000 horas anuales. Además, en nuestro caso, la capacidad calorífica está en $J/mol \cdot K$, por lo que se debe pasar a $KJ/kg \cdot K$ mediante la masa molar de los compuestos, es decir por ejemplo con el ZnO:

Tabla 23. Características de energía del ZnO.

	Cp (J/mol · K)	Mr (g/mol)
ZnO	44.77	81.38

Por tanto, la capacidad calorífica del óxido de zinc en $KJ/kg \cdot K$. se calcula de la siguiente manera:

$$C_p \left(\frac{KJ}{kg \cdot K} \right) = \frac{C_p \left(\frac{J}{mol \cdot K} \right)}{Mr (g/mol)} = \frac{44.77}{81.38} = 0.55 \frac{KJ}{kg \cdot K}$$

Estos cálculos se realizan para todos los compuestos igual. Por lo que, a continuación, se muestra en la Tabla 24 las características energéticas de los compuestos minoritarios [15] [16]:

Tabla 24. Características energéticas de los componentes minoritario de las escorias.

	Cp (J/mol · K)	Mr (g/mol)	Cp (kJ/kg · K)
ZnO	44.77	81.38	0.55
V₂O₅	190.79	181.88	1.05
Cr₂O₃	128.7	151.99	0.85
CoO	49.88	159.69	0.31
As₂O₅ (*)	N. S	229.84	N. S
MnO₂ (*)	N. S	86.94	N. S
CdO (*)	N. S	128.41	N. S
Sb₂O₃ (*)	N. S	291.52	N. S
HgO	60.22	216.59	0.28
CuO	56.79	79.55	0.71
PbO₂	79.77	239.2	0.33
TiO₂	100.416	79.87	1.26
Ni₂O₃ (*)	N. S	165.39	N. S

(*) N. S = No Significante

III. Desarrollo proyecto

Por tanto, la energía de cada componente tanto de las escorias como de las cenizas se muestran en las Tablas 25 y 26:

Tabla 25. Datos y energía pérdida por cada componente en Escorias.

ESCORIAS	kg/hora escoria	kg/año escoria	Energía (kJ/año)
ZnO	108.88	871064.92	395342841.9
V ₂ O ₅	1.36	10852.61	9392017.4
Cr ₂ O ₃	220.69	1765548.63	1233377499.6
CoO	0.29	2284.76	588773.5
As ₂ O ₅ (*)	0.43	3427.14	N. S
MnO ₂ (*)	24.06	192491.07	N. S
CdO (*)	0.21	1713.57	N. S
Sb ₂ O ₃ (*)	1.86	14850.94	N. S
HgO	1.00	7996.66	1834277.4
CuO	71.26	570047.73	335756285.1
PbO ₂	1.00	7996.66	2200093.2
TiO ₂	0.07	571.19	592482.6
Ni ₂ O ₃ (*)	3.57	28559.51	N. S

Tabla 26. Datos y energía pérdida por cada componente en las cenizas volantes.

CENIZAS VOLANTES	kg/hora escoria	kg/año escoria	Energía (kJ/año)
ZnO	605.88	4847078.00	2199902159.2
V ₂ O ₅	7.55	60389.82	52262282.9
Cr ₂ O ₃	1228.06	9824470.88	6863181867.8
CoO	1.59	12713.65	3276255.2
As ₂ O ₅	2.38	19070.47	N. S
MnO ₂	133.89	1071124.78	N. S
CdO	1.19	9535.24	N. S
Sb ₂ O ₃	10.33	82638.71	N. S
HgO	5.56	44497.77	10206915.0
CuO	396.51	3172054.98	1868330214.4
PbO ₂	5.56	44497.77	12242512.8
TiO ₂	0.40	3178.41	3296894.9
Ni ₂ O ₃	19.87	158920.59	N. S

(*) N. S = No Significante, ya que su proporción es tan minoritaria con respecto a los demás componentes que apenas habrá perdidas por parte de estos.

Para conocer la energía tota de las escorias y las cenizas se aplican estas ecuaciones:

III. Desarrollo proyecto

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

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

Por tanto, la pérdida de energía de las escorias en este proyecto es de 1971.1 GJ/año y la de las cenizas volantes es de 11012.7 GJ/año. En una caldera u horno, normalmente las pérdidas de calor de los gases suelen ser mucho mayor que en los sólidos, ya que de normal la temperatura a la que están los gases es mucho mayor a la temperatura ambiente, y, por otro lado, al ser un horno de lecho fluidizado se generan muchas más cenizas volantes que escorias, por tanto, esto también provoca que las pérdidas de calor de las cenizas volantes sean mayores a la de las escorias.

III.1.4.3. Rendimiento del proceso y rendimiento energéticos

A continuación, una vez calculadas todas las pérdidas de calor que sufre el horno, se calculará el rendimiento total de la instalación, para ello se deben conocer el rendimiento por combustión, el rendimiento de la caldera y el rendimiento de vapor.

En primer lugar, el rendimiento de combustión se calcula con la siguiente ecuación:

$$\eta_{comb} = \frac{(E_{comb} + E_{aire} + E_{Gas\ Natural}) - E_{Gases} - E_{escorias} - E_{cemizas}}{E_{comb} + E_{aire} + E_{Gas\ Natural}}$$

Por lo que se obtiene un rendimiento de la combustión del 60%. Seguidamente, para calcular el rendimiento de la caldera hay que definir primero las pérdidas que sufrirá esta. La caldera por un lado tendrá pérdidas por radiación y pérdidas térmicas. Según el BREF, para un horno de parrilla las perdidas térmicas suponen un 7% y las pérdidas por radiación suponen un 3%, como no se han encontrado los datos para un horno de lecho fluidizado se estiman que estas pérdidas serán las mismas que el de parrilla. Por tanto, el rendimiento de la caldera se calculará con la siguiente ecuación:

$$\eta_{caldera} = \eta_{comb} \cdot \eta_{térmica} \cdot \eta_{rad}$$

Por tanto, como tenemos las pérdidas térmicas y de radiación, para conocer el rendimiento de estas solo hay que restarle las pérdidas al 100%. Una vez hecho, se

III. Desarrollo proyecto

obtiene un rendimiento de la caldera de un 54%, este rendimiento es un poco más bajo de lo habitual, ya que normalmente un horno de lecho fluidizado tiene un rendimiento por encima de un 60%, según el BREF.

Finalmente, la finalidad del calor total generado en la planta incineradora se quiere aprovechar para generar energía eléctrica, por lo que para convertir este calor en electricidad se utilizará una turbina de vapor. Esta turbina de vapor también tiene un rendimiento de funcionamiento, el cual se calcula con la siguiente ecuación:

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

Para la eficiencia interna, se sabe que las pérdidas internas en un horno de lecho fluidizado son más pequeñas que un horno de parrilla, por lo que, si en un horno de parrilla las pérdidas internas son del 10%, en un horno de lecho fluidizado se estiman que serán de un 8%. Por tanto, se obtendrá un rendimiento de vapor de un 48%.

A continuación, una vez calculado el rendimiento de vapor se calcula la energía de vapor que se genera, por tanto, si:

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

Se obtiene una energía de vapor de 520 936 GJ/año. Seguidamente, se calcula la cantidad de vapor que se puede producir:

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

Donde,

$$h_{450^{\circ}C, 50bar} = 3.35 \left(\frac{GJ}{t} \right)$$

$$h_{150^{\circ}C, 50bar} = 0.55 \left(\frac{GJ}{t} \right)$$

Estos parámetros de vapor se han estimado a partir de un valor medio basándose en otras plantas que operan entre 40 - 70 bares y 400 - 450 °C.

III. Desarrollo proyecto

Por otro lado, para conocer la potencia eléctrica de la planta, se sabe que la eficiencia eléctrica de una planta con un horno de lecho fluidizado varía entre 15 y el 25% dependiendo del tamaño de la planta y las condiciones de vapor. Esta eficiencia es relativamente baja en comparación con las plantas de combustibles fósiles debido al menor poder calorífico del combustible y de las limitaciones de las temperaturas de vapor para evitar la corrosión excesiva causada por los gases ácidos y otros compuestos producidos en la combustión. Por tanto, para conocer la potencia eléctrica, se aplica la siguiente fórmula:

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

Finalmente, la cantidad de vapor que se produce en la planta es de 190 183 t/año y la planta tendrá por ende una potencia eléctrica de 133 128 GJ/año.

Por último, se calculará el rendimiento total de la instalación completa:

$$\eta_{Total} = \frac{E_{eléctrica} \left(\frac{GJ}{año} \right)}{(E_{comb} + E_{aire} + E_{Gas Natural}) \left(\frac{GJ}{año} \right)}$$

Por lo que el rendimiento total de cada línea de la planta es de un 12%, este es muy bajito ya que la eficiencia eléctrica de la instalación afecta indirectamente al rendimiento total y por tanto como la eficiencia eléctrica es bajita debido a las razones explicadas anteriormente, el rendimiento total será pequeño.

IV. ESTUDIO ECONÓMICO

IV. Estudio Económico

IV.1. Estudio Económico

En este apartado, se evaluará la viabilidad económica del proyecto, es decir se comprobará la rentabilidad de poner en marcha dicha incineradora. Para ello, se calcularán los beneficios anuales en función de los costes de personal, mantenimiento, materia prima, reactivos, etc. Además, también se calcularán los ingresos de dicha planta incineradora debido a su actividad de valorización energética.

En este estudio económico la estimación de los costes de basará en el Anexo 10.2 del documento BREF. Aun así, las cifras indicadas en este anexo se deben tomar como estimaciones, ya que no son valores precisos. Los aspectos económicos más importantes para tratar en este estudio económico son:

- Costes de descarga y almacenamiento
- Costes de la planta de lecho fluidizado (sin incluir pretratamiento)
- Costes de tratamiento de los gases de combustión
- Costes del ciclo de vapor de agua para la recuperación de energía

Los costes de una planta incineradora de residuos dependen fundamentalmente del diseño de la planta (tamaño e infraestructura local), las condiciones específicas para el desecho de residuos y la posibilidad de aprovechamiento de energía.

A continuación, se van a mostrar los siguientes costes:

- Costes de inversión
- Costes de mantenimiento
- Otros costes: costes de personal, costes de reactivos o costes de eliminación de residuos.

En el documento BREF proporciona los costes en función de las toneladas de residuos o lodos tratados, por lo que en nuestro caso se ha realizado una estimación de los costes aproximada según la cantidad de lodos tratado, en este caso 280 000 tn lodos/año.

A continuación, se van a definir los costes de personal, los cuales se clasificarán en este estudio económico como costes fijos. Hay que tener en cuenta que las plantas incineradoras no trabajan las 24 horas del día en un año, debido a revisiones, limpiezas

IV. Estudio Económico

de maquinaria o cualquier otro inconveniente. Por ello, como bien se ha mencionado anteriormente en otros apartados, esta planta trabaja un total de 8000 horas al año, lo cual equivalen a 334 días al año. Por tanto, para asignar los puestos de trabajo en la planta incineradora se debe de tener en cuenta que tiene que haber ingenieros de procesos y operarios que se encarguen de supervisar las máquinas y de la limpieza y mantenimiento. Siendo así, que para que la planta incineradora no tenga que parar la maquinaria se deben de asignar a los trabajadores jornadas de trabajo a 3 turnos (mañana, tarde y noche).

Por ende, en la planta incineradora se estiman que haya 18 trabajadores en total, de los cuales 15 serán operarios y 3 ingenieros, por tanto, en cada turno habrá 5 operarios y 1 ingeniero. A partir de la tabla salarial del convenio de los trabajadores del sector industrial, un operario cobrará 1500 € y un ingeniero 2500 € [17]. Por lo que, los costes de personal serán:

$$\text{Costes Personal (€)} = 15 \cdot 1500\text{€} + 3 \cdot 2500\text{€} = 30\ 000\ \text{€}$$

Por lo que, en total de costes de personal serán un total de 30 000 €/año.

Otro coste fijo de la planta será el valor del terreno donde se edifique la planta y sus instalaciones. Para ello, como la ubicación de la planta es muy específica porque se debe situar justo al lado de la cementera de Alicante (CEMEX) debido a que el pretratamiento de los lodos se realizara en dicha empresa, se ha buscado una estimación del precio de terreno por m² que hay en esa zona, lo cual equivale a 150 €/m² [18]. Por tanto, el cálculo será el siguiente:

$$\text{Coste de terreno (€)} = \text{Precio} \left(\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right) \cdot \text{m}^2 \text{ de la parcela}$$

$$\text{Coste de terreno (€)} = 150 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} \cdot 5000\ \text{m}^2 = 750\ 000\ \text{€}$$

Entonces el coste del terreno para nuestra planta incineradora será de 750 000 €.

A continuación, en la Tabla 27 se muestran según los datos del BREF, los resultados obtenidos de los costes más importantes en nuestra planta incineradora. Cabe recalcar que esto es una estimación y no son valores precisos.

IV. Estudio Económico

Tabla 27. Resumen estimación de costes más relevantes.

	Inversión (M€)	Mantenimiento (€/año)	Costes Variables (€/año)
Costes de almacenamiento y descarga	5	144 000	-
Costes de sistema de combustión y caldera	23	3 450 000	5 257 307
Costes de ciclo de agua-vapor	16	403 200	-
Costes de post-tratamiento de combustión CAL-Coque	2	262 080	285 212
Costes de RCNS	1	37 440	3215
TOTAL (M€)	47	4.3	5.55

Si se observan los datos de la Tabla 27, los costes variables del sistema de combustión y caldera son los más elevados y esto es porque dentro de estos se han incluido los gastos del combustible auxiliar (gas natural), los costes de electricidad del sistema y los costes de la gestión de eliminación de las cenizas de fondo y de caldera. Además, en los costes variables de postcombustión de tratamiento de gases, se incluyen los gastos de los reactivos. Los cálculos específicos de dichos costes variables se muestran a continuación.

Los costes variables para el sistema de combustión y caldera son:

- Coste de electricidad del sistema

$$\text{Coste electricidad (€)} = \text{Coste electricidad} \left(\frac{\text{€}}{\text{tn}} \right) \cdot \text{tn lodos tratados}$$

Siendo,

$$\text{Costes de electricidad €/tn de lodos tratados} = 1.67.$$

- Coste de la gestión de eliminación de cenizas de fondo o escorias

Gestión de elminiacion de cenizas de fondo y de caldera (€)

$$= \text{Costes de gestión} \left(\frac{\text{€}}{\text{tn}} \right) \cdot \text{tn cenizas y escorias generadas}$$

Donde,

$$\text{Costes de gestión (€/tn)} = 6.$$

IV. Estudio Económico

Cenizas y escorias generadas = 23408 tn/año.

- Coste del combustible auxiliar (Gas Natural)

$$\text{Coste del gas natural (€)} = \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \text{ Gas Natural}} \cdot \text{coste luz} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \cdot \text{m}^3 \text{ GN utilizados}$$

Donde,

$$\text{kWh/m}^3 = 11.7; \text{ Coste luz} = 0.23 \text{ €/kWh};$$

$$\text{Volumen Gas Natural utilizado} = 1\,728\,000 \text{ m}^3.$$

Los costes variables de los costes de postcombustión de tratamiento con cal y coque se desglosan de la siguiente manera.

- Carbón activo

$$\text{Coste carbon activo (€)} = \text{precio coque} \left(\frac{\text{€}}{\text{tn}} \right) \cdot \text{Cantidad coque utilizada}$$

Siendo,

$$\text{Precio coque} = 500 \text{ €/tn coque}$$

$$\text{Cantidad de coque utilizada} = 86.4 \text{ tn/año}$$

- Cal apagada o hidratada

$$\text{Coste cal (€)} = \text{Precio cal} \left(\frac{\text{€}}{\text{tn}} \right) \cdot \text{Cantidad de cal utilizada}$$

Siendo,

$$\text{Precio cal} = 100$$

$$\text{Cantidad de cal utilizada} = 2413 \text{ tn/año}$$

- Costes de eliminación de residuos

$$\text{Coste de eliminación cal/coque (€)}$$

$$= \text{Coste específico} \left(\frac{\text{€}}{\text{tn}} \right) \cdot \text{tn Cal/Coque (residuo)}$$

IV. Estudio Económico

Siendo,

Coste específico de eliminación = 0.16 €/tn

Cantidad de cal y coque a eliminar = 4541 tn/año

Por último, los costes variables de los costes del sistema RNCS para el tratamiento de los NOx, se desglosan en:

- Coste de la Urea utilizada

$$\text{Coste Urea (€)} = \text{Precio Urea} \left(\frac{\text{€}}{\text{tn}} \right) \cdot \text{Cantidad urea utilizada}$$

Siendo,

Precio de urea = 50 €/tn

Cantidad de urea utilizada = 65 tn/año

En la siguiente tabla (Tabla 28) se muestra un resumen de estos costes variables.

Tabla 28. Resumen de los costes variables.

COSTES VARIABLES	
Concepto	Total (€)
Costes de sistema de combustión y caldera	
Costes de electricidad	480 960
Costes de eliminación de cenizas de fondo y de caldera	140 451
Costes de gas natural	4 635 895
Costes de postratamiento de combustión Cal-Coque	
Carbón activo	43 200
Cal apagada o hidratada	241 285
Coste para la eliminación de residuos	727
Costes de RCNS	
Urea	3 215

Debido a que la planta incineradora tiene su función de valorización energética para aprovechar la energía que se genera durante el proceso y aprovecharla para convertirla en energía eléctrica, de ello se obtiene un beneficio. Para ello se realizan los siguientes cálculos.

IV. Estudio Económico

Gracias al balance de energía que se ha realizado, se sabe que se genera una potencia eléctrica de 133 128 GJ/año, lo cual equivalen a unos 4623 kilovatios. Esta potencia eléctrica, cabe recalcar que se generaría solo por una línea de las 5 que existen en la planta incineradora, es decir, la que se genera por solo un horno de lecho fluidizado. Por lo que, para obtener un beneficio económico se tendrá que vender esta potencia eléctrica a las empresas de electricidad del país. Haciendo una búsqueda por internet se han encontrado los siguientes precios de la luz de las compañías eléctricas más conocidas en España (Tabla 29).

Tabla 29. Precio de la luz de varias compañías eléctricas españolas.

Compañías eléctricas	€/kWh
IBERDROLA	0.2293
EDP	0.2488
Endesa	0.2155
Gas natural Fenosa	0.2347

Por tanto, mediante la media de estos precios, la energía eléctrica generada en la planta se venderá al mercado por un precio de 0.2293 €/kWh. De tal manera que el beneficio será:

$$\text{Beneficio total } (\text{€}) = n^{\circ} \text{ líneas} \cdot \text{precio luz } \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \cdot E_{\text{eléctrica}} (\text{kW})$$

$$\text{Beneficio total } (\text{€}) = 5 \cdot 0.2293 \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \cdot 4623 (\text{kW}) = 5300 \text{ € aprox.}$$

Así que, como bien era de esperar que dicho proceso no era rentable económicamente, ya que se genera muy poco beneficio para todos los gastos que hay que pagar. Pero la ventaja de este proyecto es que su parte medioambiental es la más importante ya que la finalidad principal es que estos lodos que no se puedan verter como fertilizante, no se envíen a vertederos que son una de las mayores fuentes de contaminación.

Finalmente, si se suma los costes fijos y variables sin tener en cuenta los costes de inversión inicial realizada, se obtiene que la planta incineradora de este proyecto costará unos 5 545 735 € al año, por lo que supone un coste específico de 19.25 € por tonelada de lodo al año.

V. CONCLUSIONES

V.1. Conclusiones

Mencionar que para el diseño de una planta incineradora una referencia que sirve de mucha ayuda es el documento BREF de “Mejoras Técnicas Disponibles de referencia Europea para incineración de residuos”, ya que es un guía muy completa donde se detalla muy bien el funcionamiento de las distintas tecnologías de incineración de residuos. Además, dicho documento también tiene bastante información sobre determinadas plantas ya existentes en la Unión Europea mostrando los datos incluso de dichas plantas, lo cual también sirve para poder comparar los resultados de los cálculos del diseño.

Por tanto, tras el análisis realizado para el diseño de una planta incineradora donde se quieren tratar lodos de depuradora de toda la Comunidad Valenciana, se puede deducir que para este proyecto con una alimentación de 384 toneladas de lodos en materia húmeda al año, se ha elegido que la opción más adecuada como horno para la planta incineradora sea uno de lecho fluidizado de borboteo, ya que esta tecnología de incineración es una de las más indicadas para tratar lodos de depuradora debido a su tamaño de partícula tan pequeño que poseen. Además, dicho horno de incineración tendrá un rendimiento superior a otro como el de parrilla, pero la maquinaria es mucho más cara.

Asimismo, debido a que dichos hornos requieren de un tratamiento previo de secado y si fuera necesario de triturado, esto se ha rentabilizado ya que se ha optado por diseñar la planta incineradora muy cerca de la cementera de Alicante CEMEX ya que así, se ahorraría por un lado el coste del transporte de los lodos y por otro lado el coste del secado y triturado, donde en este caso se encargará la cementera.

Por otro parte, para el tratamiento de los gases de combustión que se generan se han tenido que elegir los sistemas de tratamiento oportunos. Dicho lo cual, para tratar los NO_x se ha elegido un sistema RNCS (Reducción No Catalítica Selectiva), ya que se han elegido sistemas que no consumo mucho energéticamente pero que aun así tenga una alta eficiencia para que así sea rentable. Para el tratamiento de los gases ácidos, SO₂ y HCl, se ha optado por un sistema de absorción semihúmeda con cal apagada o hidratada y finalmente como tratamiento final y complementario a dichos sistemas, para

V. Conclusiones

asegurarse de que las concentraciones de los gases estén por debajo del límite establecido, se ha aplicado un sistema de absorción con carbón activo.

Uno de los hándicaps de esta planta incineradora no era obtener un beneficio energético con la energía generada durante la combustión. Gracias a los cálculos realizados se ha obtenido que el rendimiento total de la planta es de un 12%, por lo que la energía generada, la cual es 4623 kW, nunca va a superar a la suministrada. Sin embargo, dicha planta puede ser parcialmente autosuficiente, ya que esta energía se podría aprovechar para el mismo proceso o por otro lado también está la opción de venderla a una compañía de la luz. Con estos cálculos también se ha establecido que en la planta se generan 2.31 GJ por tonelada de residuo.

Además, se llega a la conclusión de que dicha planta no es rentable económicamente, ya que los costes anuales para mantener la planta incineradora en funcionamiento sobrepasan con creces a los beneficios que se generan.

Esto no quiere decir que la planta no sea rentable a nivel medioambiental y social, de hecho, actualmente, debido a como está el sistema legislativo con la protección del medioambiente es una buena opción para poder aprovechar los lodos que no sean aptos para la agricultura debido a su peligrosidad en la composición química y se puedan aprovechar para la generación de energía. Además, la creación de dichas plantas incineradoras crearía puestos de trabajo lo que supondría un beneficio social importante. También es muy importante apoyar estas inversiones ya que, dichos proyectos son una vía de apoyo para conseguir una economía circular.

Por ende, a largo plazo, este tipo de proyectos, aunque se tarde mucho en recuperar la inversión inicial, esto no importa ya que la finalidad fundamental es mantener el medioambiente limpio, y que dichos residuos que la sociedad y las industrias generan no logren dañar el medioambiente y pueda llevar a graves consecuencias por ello.

VI. APÉNDICES

VI.1. Referencias

- [1] G. d. España, «Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos,» de *Serie Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC)*, pp. 1-864.
- [2] Instituto Nacional de Estadística, [En línea]. Available: https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/categoria.htm?c=Estadistica_P&cid=1254735976612.
- [3] J. Duch Guillot, «Economía circular: definición, importancia y beneficios,» *Parlamento Europeo*, pp. 1-4, 21 04 2022.
- [4] J. Duch Guillot, «Gestión de residuos en la UE: hechos y cifras (infografía),» *Parlamento Europeo*, pp. 1-7, 04 12 2020.
- [5] M. Planelles, «El País,» 31 Marzo 2022. [En línea]. Available: <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2022-03-31/el-congreso-aprueba-definitivamente-la-ley-de-residuos-que-crea-nuevos-impuestos-para-plasticos-y-vertederos.html#?rel=mas>.
- [6] M. p. l. t. e. y. e. r. demográfico. [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/lodos-depuradora/>.
- [7] M. D. M. A. Y. M. R. Y. MARINO, «Caracterización de los lodos de depuradoras generados en España,» INVENTIA, S.L, 2009.
- [8] Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana, «Memoria de Gestión 2019,» 2019.
- [9] F. J. Colomer Mendoza, A. Gallardo Izquierdo, F. Robles Martínez, M. D. Bovea y L. Herrera Prats, «Opciones de valorización de lodos de distintas estaciones depuradoras de aguas residuales,» pp. 177-190, 2011.

- [10] «Gobierno de España,» 4 12 2000. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/doue/2000/332/L00091-00111.pdf>.
- [11] B. & W. Vølund, «21' Century Advanced Concept for Waste-Fired Power Plants,» pp. 1-52.
- [12] E. P. A. Air, «Óxidos de nitrógeno (NOx) ¿Por qué y como se controlan?,» EPA-456-F-00-002, United States, 1999.
- [13] Q. W. J. C. Q. Wang, «Experimental study of urea on SNCR removal of NOX,» *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, vol. 6, n° 7, pp. 2541-2546, 2014.
- [14] Badcock y Wilcox, «Spray Dryer Absorber (SDA),» [En línea]. Available: <https://www.babcock.com/home/products/spray-dryer-absorber-sda/Bad>.
- [15] T. N. I. o. S. a. T. (NIST), «Libro de Web de Química del NIST,» The National Institute of Standards and Technology (NIST), [En línea]. Available: <https://webbook.nist.gov/chemistry/>.
- [16] «Energía en Transito,» [En línea]. Available: <https://thermodynamis.wordpress.co>.
- [17] Comisiones Obreras, «Tablas salariales convenio de industria de servicios e instalaciones del metal de la CAM».
- [18] Maison Alicante Solution & House, «habitaclia,» [En línea]. Available: https://www.habitaclia.com/comprar-industrial-terreno_en_junto_a_la_carretera_de_ocana_pol_ciudad_de_asis-alicante-i8911004028690.htm?f=&st=3&geo=p&from=list&lo=55.

