

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS LODOS DE EDAR

Alumno/Alumna: López Martínez, Natalia

Director/Directora (1): De La Peña Aranguren, Víctor

Curso: 2018-2019

Fecha: Bilbao, 19/07/2019

RESUMEN

En el presente trabajo se realizará el estudio del funcionamiento de una planta de valorización energética de los lodos de una EDAR. Este tipo de instalaciones consta de una caldera, donde se quema el residuo a valorizar; una turbina, un generador, un condensador, un desgasificador y una bomba.

Para comenzar con el trabajo, se estudiará el funcionamiento y procesos básicos que se dan en una EDAR hasta conseguir los lodos a valorizar. También se estudiarán las diferentes alternativas que se pueden encontrar para dicho residuo. Una vez elegida la alternativa que se va a llevar a cabo (la incineración), se explicará cada uno de los elementos básicos de la planta de valorización anteriormente mencionados.

Por otro lado, se realizará un dimensionamiento de la planta teniendo en cuenta las características del residuo y los datos de operación y de los fabricantes de los equipos que se van a utilizar. De este dimensionamiento se obtendrán los datos más relevantes de la planta, como pueden ser los caudales máxicos necesarios para el funcionamiento de la planta o la potencia que se obtendrá anualmente.

Una vez se obtengan los datos característicos de la planta, se llevará a cabo un estudio económico que se basará en calcular el precio de cada uno de los elementos necesarios, los gastos que se dan a lo largo de la vida útil de los mismos, los ingresos anuales que se obtendrán gracias a la planta y el tiempo de retorno simple.

Además, se realizará un cronograma en el que se describirán las tareas principales necesarias para la realización del proyecto y el tiempo que requiere cada una de ellas.

Finalmente, se expondrán las conclusiones obtenidas tras la realización del presente trabajo.

ABSTRACT

In the present work, the study of the operation of a plant for energy recovery of the sludge from a WWTP will be carried out. This type of facility consists of a boiler, where the waste to be valorized is burned; a turbine, a generator, a condenser, a degasser and a pump.

To begin with, the operation and basic processes that take place in a WWTP until getting the sludge to be valued, will be studied. The different alternatives that can be found for this waste will also be analyzed. Once the alternative that is going to be carried out (incineration) has been chosen, each of the basic elements of the recovery plant will be explained.

Furthermore, a sizing of the plant will be carried out taking into account the characteristics of the waste, the operation data and data given by the manufacturers of the equipment. From this dimensioning, the most relevant data of the plant will be obtained, such as the mass flow rates required for the operation of the plant or the power that will be obtained annually.

Once the characteristic data of the plant is obtained, an economic study will be carried out that will be based on calculating the price of each one of the necessary elements, the expenses that are given throughout the useful life of the facility, the annual income that will be obtained and the simple return time.

In addition, a schedule will be made in which the main necessary tasks to carry out the project and the time required for each of them will be described.

Finally, the conclusions obtained after doing this work will be explained.

LABURPENA

Lan honetan, HUA (Hondakin Uren Araztegia) baten lokatzaren energia berreskuratzeko planta baten funtzionamendua aztertuko da. Instalazio mota honen elementuak honako hauek dira: galdara (berreskuratu beharreko hondakinak erretzen diran lekua); turbina, sorgailua, kondentsadorea, gasgabetzailea eta ponpa.

Lanarekin hasteko, HUA baten funtzionamendua eta bertan gertatzen diren oinarrizko prozesuak lohiak lortzeko ikertuko dira. Hondakin honetarako dauden alternatibak ere aztertuko dira. Gauzatuko den alternatibak aukeratutakoan (errausketa), aipatutako berreskuratze plantako oinarrizko elementu guztiak azalduko dira.

Bestalde, instalazioaren neurriak ezarriko dira; hondakinen ezaugarriak, funtzionamenduaren datuak eta erabili beharreko ekipamendu fabrikatzaileak emandako datuak kontuan hartuta. Egindako kalkuluekin, instalazioaren datu garrantzitsuenak lortuko dira, hala nola, instalazioaren funtzionamendurako beharreko masa-fluxuak edo urtero lortuko den energia.

Instalazioaren datu bereizgarriak lortzen direnean, azterketa ekonomiko bat egingo da: beharrezko elementu bakoitzaren prezioa kalkulatz eta horien erabilgarritasunean zehar ematen diren gastuak kontuan hartzen; urteko diru-sarrerak lortuko dira eta hasierako inbertsioaren itzulera-denbora sinplea ere.

Horrez gain, proiektua burutzeko beharrezkoak diren zeregin nagusiak eta horietako bakoitzak behar dituen denbora deskribatuko dira.

Azkenean, lan hau burutu ondoren lortutako ondorioak aipatuko dira.

CONTENIDO:

Resumen.....	1
Abstract	2
Laburpena	3
INDICE DE ILUSTRACIONES.....	5
INDICE DE TABLAS	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2. FUNCIONAMIENTO DE UNA EDAR	9
3. OBJETIVOS	12
4. ALCANCE.....	13
5. ALTERNATIVAS	14
5.1 Digestión anaerobia.....	14
5.2 Combustión.....	15
5.3 Compostaje	16
6. ALTERNATIVA SELECCIONADA	18
6.1 Digestión anaerobia	18
6.2 Combustión	18
6.3 Compostaje	18
7. FUNCIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN.....	19
7.1 Funcionamiento de la instalación	19
7.2 Descripción de los elementos del ciclo Rankine	20
7.2.1 Caldera de lecho fluido.....	20
7.2.2 Turbina de vapor	23
7.2.3 Generador	25
7.2.4 Condensador	26
7.2.5 Desgasificador	27
7.2.6 Bomba de alimentación:	29
8. DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA.....	29
8.1 Análisis de la composición de los lodos	30
8.2 Dimensionamiento de la planta.....	31
8. ESTUDIO ECONÓMICO:	36
9. CRONOGRAMA:.....	38
10. CONCLUSIONES:	39
11. BIBLIOGRAFÍA:	40
ANEXO i: Dimensionamiento de la planta con EES	42

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Posicionamiento de los países respecto al protocolo de Kioto.....	7
Ilustración 2. Objetivos 20-20-20	8
Ilustración 3. Estación Depuradora de Aguas Residuales	9
Ilustración 4. Líneas de aguas y fangos	10
Ilustración 5. Esquema básico de una EDAR	11
Ilustración 6. Digestor anaerobio.....	15
Ilustración 7. Dispositivo de deshidratación mecánica	15
Ilustración 8. Secado térmico.....	16
Ilustración 9. Línea de acción del secado térmico	16
Ilustración 10. Comparación compostaje y aplicación directa en agricultura	17
Ilustración 11. Diagrama T-s del Ciclo Rankine básico	20
Ilustración 12. Esquema del Ciclo Rankine.....	20
Ilustración 13. Incineración en caldera de lecho fluido	21
Ilustración 14. Fenómeno de fluidización	21
Ilustración 15. Desarrollo de la fluidización	22
Ilustración 16. Esquema caldera de lecho fluido	22
Ilustración 17. Turbina de vapor	23
Ilustración 18. Partes de la turbina de vapor	24
Ilustración 19. Dibujo esquemático de un generador eléctrico.....	25
Ilustración 20. Elementos de un generador	26
Ilustración 21. Condensador por fuera y por dentro	26
Ilustración 22. Condensador de tubos y coraza	27
Ilustración 23. Desgasificador	28
Ilustración 24. Bomba de alimentación	29
Ilustración 25. Esquema de la instalación con datos	31
Ilustración 26. Diagrama de Gantt	38

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas de la digestión anaerobia.....	18
Tabla 2. Ventajas y desventajas de la combustión.....	18
Tabla 3. Ventajas y desventajas del compostaje.....	18
Tabla 4. Análisis de los residuos orgánicos de los lodos de una EDAR	30
Tabla 5. PCI de diferentes lodos.....	31
Tabla 6. Datos del proceso	32
Tabla 7. Datos de diseño	32
Tabla 8. Datos de los equipos.....	32
Tabla 9. Resultados obtenidos	35
Tabla 10. Desglose de la inversión inicial.....	36
Tabla 11. Desglose del payback.....	37

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo de fin de grado tiene como objetivo la valorización energética de los fangos de una estación depuradora de aguas residuales. Dichos fangos son obtenidos tras los diferentes procesos a los que el agua es sometida para su depuración, y por lo tanto son residuos no deseados y contaminantes, a los que hay que buscar una utilidad. Para su valorización, realizaremos un estudio de los procesos y equipos necesarios; además de un estudio económico de la planta valorizadora.

En la actualidad, cada vez es mayor la preocupación de gobiernos y ciudadanos por el cambio climático. Es por esto que en las últimas dos décadas organismos importantes, tanto de Europa como del resto de continentes, se han propuesto realizar cambios en las políticas y también firmar tratados entre países en los cuales se comprometan a intentar parar los efectos que está teniendo el cambio climático en el mundo.

En lo que al marco mundial se refiere, uno de los tratados más importantes es el protocolo de Kioto. Este protocolo entró en vigor el 16 de febrero de 2005 tras la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro y tomaron parte de él 187 estados, los cuales se pueden observar en el mapa posterior. El objetivo del protocolo de Kioto era la reducción mundial total de un 5% de la emisión de gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 , N_2O , HFC, PFC, SF_6) respecto del año 1990. Esta reducción debía ser conseguida progresivamente entre los años 2008 y 2012, sin embargo, finalmente en 2012 la reducción de gases nocivos total fue de un 22,6%, un porcentaje aproximadamente 4 veces mayor del deseado. Por otro lado, se ha realizado una ampliación del Protocolo de Kioto que durará hasta 2020, ascendiendo la reducción del porcentaje de emisiones al 20%, dado que a partir 2012 la emisión de gases contaminantes aumentó.

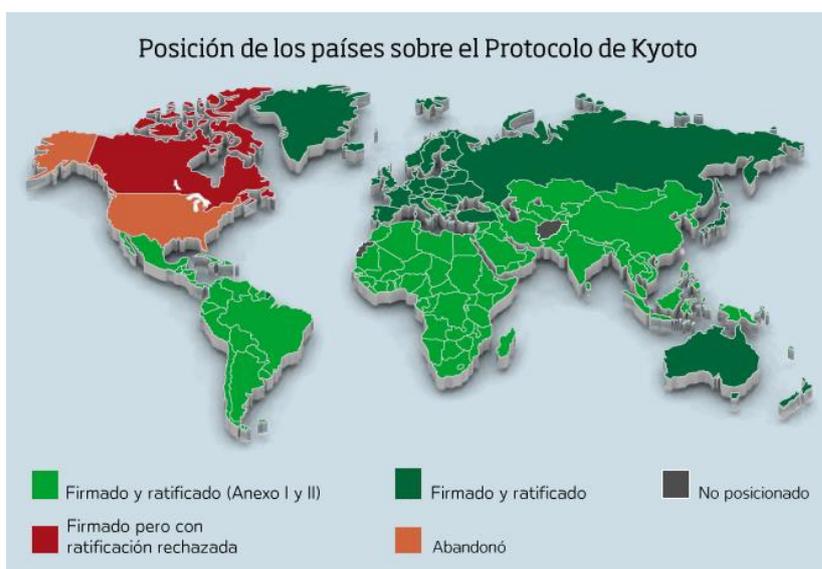


Ilustración 1. Posicionamiento de los países respecto al protocolo de Kioto

Continuando con la misión del protocolo de Kioto, el Acuerdo de París, que entró en vigor el 4 de noviembre de 2016, tiene como objetivo la limitación del aumento de la temperatura de la tierra a 2º C. Para llegar a conseguir este propósito de cara al año 2030, las acciones propuestas abarcan desde la reducción de las emisiones de gases, el aumento de la eficiencia energética de los países y el abastecimiento energético mundial mediante energías renovables.

Dada la ausencia de contaminación que supone la utilización de energías renovables, cada vez más países apuestan por su utilización además de incentivar su uso y desarrollo. Son muchas las organizaciones que buscan un total abastecimiento energético mediante las energías renovables. Este es el caso de la Unión Europea, cuyo objetivo para el año 2050 es abastecerse solo con energías no contaminantes. Además, también propone para ese mismo año haber reducido las emisiones de gases de efecto invernadero en un 80-95% (respecto los niveles 1990).

Esto pretende ser conseguido progresivamente y a través de los llamados “Objetivos 20-20-20”, que implican que para el año 2020 se haya dado una reducción del 20% en la emisión de gases de efecto invernadero, un aumento del 20% en la eficiencia energética y un incremento del 20% en la proporción de energías renovables.

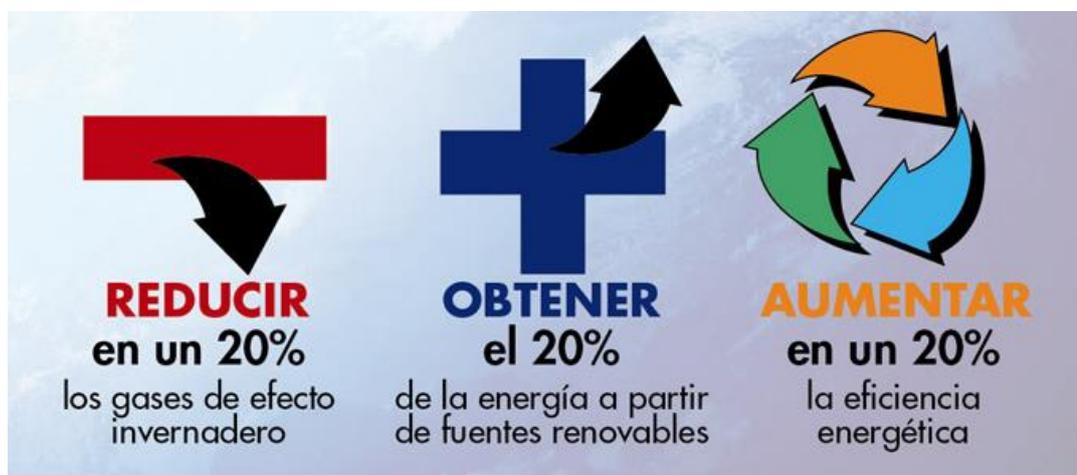


Ilustración 2. Objetivos 20-20-20

2. FUNCIONAMIENTO DE UNA EDAR

Las siglas EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales) hacen referencia a una instalación que se encarga de la limpieza y depuración de las aguas residuales con el objeto de devolverlas a un cauce receptor (un río, un embalse o el mar).

Actualmente, son instalaciones de gran importancia e imprescindibles en los núcleos urbanos ya que permiten la reutilización y devolución del agua que las civilizaciones utilizan continuamente. Además, previene factores de riesgo como un aporte excesivo de nutrientes a los cauces principales, daños a la salud pública o aparición de fangos que desprenden malos olores.



Ilustración 3. Estación Depuradora de Aguas Residuales

Para poder ser descontaminada, se somete al agua a una serie de procesos de limpieza que permite que sus condiciones sean aptas para la devolución. Sin embargo, de estos procesos se obtiene un residuo llamado fango o lodo que contiene gran cantidad de elementos contaminantes y tóxicos.

En cuanto a los tipos de EDAR que se pueden encontrar, se diferencian dos clases según el tipo de tratamiento que llevan a cabo, aunque puede darse el caso de que haya estaciones que combinen los dos tratamientos:

- Biológicas: su funcionamiento se basa en la utilización de procesos biológicos que transforman la materia en suspensión del agua residual en sólidos sedimentables, los cuales son fáciles de separar y retirar
- Fisio- químicas: este tipo de estaciones añaden al agua residual unos reactivos químicos que fomentan la decantación de los sólidos suspendidos en el agua

En las estaciones depuradoras de agua se diferencian dos materias que son sometidas a diferentes procesos: el agua residual y los fangos que se obtienen. Al grupo de procesos a los que son sometidas cada una de esas materias se les denomina “línea de aguas” y “línea de fangos” respectivamente.

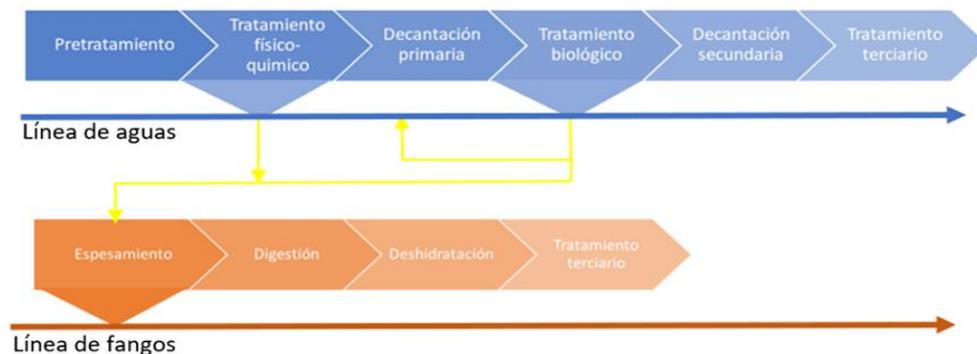


Ilustración 4. Líneas de aguas y fangos

Línea de aguas:

- Llegada: es el primer proceso por el que pasa el agua. Consta de unas rejillas que se encargan de retirar los sólidos grandes y fáciles de apartar, como por ejemplo piedras, palos o grandes plásticos.

- Pretratamiento: tras una primera limpieza superficial, el agua se prepara para la depuración mediante tres procesos básicos:

- Desbaste fino mediante tamices
- Desarenado y desengrasado
- Pozos gruesos

El objetivo del pretratamiento es retirar sólidos grandes que no hayan sido retirados a la llegada y la reducción del contenido de aceite y arena en el agua a depurar.

- Tratamiento primario: su objetivo es la reducción en un 60% aproximadamente de los sólidos que se encuentran en suspensión en el agua como por ejemplo materia orgánica en suspensión o sólidos inertes. Se basa en los siguientes procesos:

- Decantación primaria: se basa en la utilización de la gravedad como método para separar y retirar sólidos del agua
- Flotador por aire disuelto: separa las partículas que se encuentran en suspensión del agua mediante burbujas de aire
- Tratamiento fisicoquímico: utiliza reactivos que fomentan la formación de sólidos sedimentables, para facilitar su extracción

- Tratamiento secundario:
 - Tratamiento biológico: mediante unos sistemas de oxigenación, se favorece la aparición de unas bacterias que se alimentan de materia orgánica y en consecuencia se elimina gran parte de la que se encuentra en el agua
 - Decantación secundaria: en este proceso se realiza la separación entre agua depurada y lodos mediante decantadores de succión. El agua depurada y descontaminada se dirige a la obra de salida, mientras que los lodos se conducen a los reactores biológicos.
- Tratamiento terciario: este proceso se requiere únicamente cuando el destino final del agua es una zona protegida, ya que dado el caso necesita tener unas características dadas antes de ser devuelta. Se realiza una eliminación de sales, nutrientes y partículas de 0.035 micrómetros de tamaño.
- Obra de salida: se basa en la devolución del agua a un cauce receptor sin perturbar el régimen hidráulico del destinatario

Línea de fangos:

- Espesamiento: se basa en la eliminación del agua que encontramos en los lodos con el fin de reducir su volumen líquido. Esto se consigue mediante gravedad, decantación o flotación
- Digestión: su objetivo principal es la eliminación de olores y materia orgánica que no se desea ya que son perjudiciales y contaminantes para la salud y el medio ambiente. Se lleva a cabo de manera aeróbica (en presencia de oxígeno) o anaeróbica (en ausencia de oxígeno) o mediante procesos químicos explicados anteriormente.
- Deshidratación: una vez realizados los procesos anteriores, se intenta reducir al máximo la cantidad de agua de los lodos ya que eso facilita el transporte, manipulación y manejo de estos
- Tratamiento terciario: este proceso englobaría los destinos finales de los lodos, ya puede ser compostaje, incineración o cualquier otro tipo de valorización.

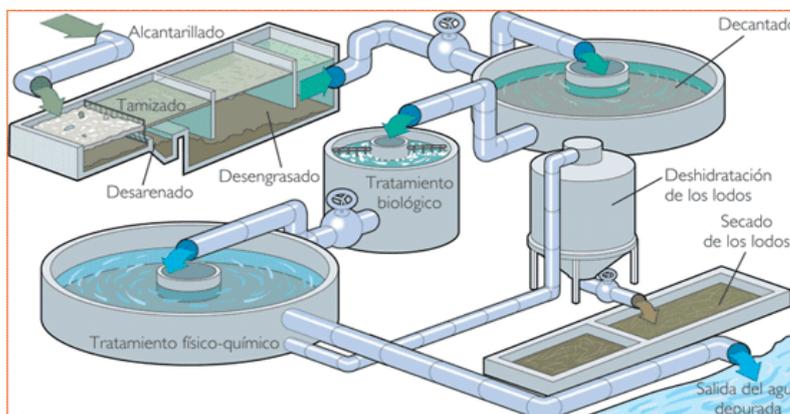


Ilustración 5. Esquema básico de una EDAR

3. OBJETIVOS

El presente proyecto tiene un objetivo principal: la valorización energética de los lodos de una EDAR con el fin de abastecer lo máximo posible a la planta de depuración. De esta forma se generará energía eléctrica a partir de un residuo que, aparte de ser contaminante y perjudicial para la salud, inicialmente no tiene gran utilidad. Esta generación de energía favorece la utilización de energías no contaminantes, ya que al incinerar el residuo que tenemos reducimos la contaminación que este crea sin emitir gases nocivos.

Como objetivos secundarios de este proyecto se encuentran la optimización energética de la planta, ya que al producir su propia energía la instalación depuradora optimiza al máximo sus recursos; y el transformar un residuo en un valor añadido dado que si en vez de llevarlos a un vertedero autorizado, se valorizan, se saca beneficio de algo que en principio era un problema.

4. ALCANCE

El proyecto abarca las siguientes fases:

- Conocimiento del funcionamiento de una Estación Depuradora de Aguas Residuales
- Estudio del residuo obtenido en la depuración
- Estudio de las alternativas para los lodos
- Estudio de los elementos de una instalación de valorización energética
- Dimensionamiento de la planta
- Estudio económico del coste de la instalación
- Planificación del proyecto
- Extracción de las conclusiones más relevantes

5. ALTERNATIVAS

Dada la problemática que nos supone la obtención de fangos una vez se ha depurado el agua residual, se debe buscar una solución mediante la cual se cumplan los objetivos anteriormente expuestos y que además sea una opción que nos ofrezca los mayores beneficios y que sea económicamente viable.

A continuación, se expondrán las alternativas más viables y útiles para la problemática que surge con los fangos de las EDAR.

5.1 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso mediante el cual se combinan bacterias que favorecen la digestión de la materia orgánica con la ausencia de oxígeno. A través de esta combinación, la materia orgánica (los lodos), se degradan con el fin de obtener por una parte, gases de gran interés (biogás) y por otra, gases con dificultades de degradación (digestato).

Los gases que se obtienen a través de este proceso son de gran interés ya que son en su gran mayoría metano (65-70% de los gases) y dióxido de carbono (25-30%). La utilidad de estos gases abarca grandes campos de aplicación como pueden ser:

- La obtención de energía eléctrica y térmica mediante motores de combustión.
- La integración de estos en un circuito energético de gas natural
- La utilización de estos como combustible de vehículos o en centrales energéticas

Los lodos introducidos en este proceso pueden ser tanto primarios como secundarios y se introducen todos juntos en el reactor cerrado, dándose el proceso que podemos observar en la ilustración posterior.

El fin de este proceso es obtener finalmente una reducción del contenido de materia orgánica de los lodos, por lo que tras la digestión anaeróbica tendremos el lodo estabilizado con menos materia orgánica y menos organismos patógenos vivos.

Todo el proceso se da en un reactor cerrado, el más común es el que podemos ver en la ilustración posterior. La digestión anaerobia se puede dividir en tres grandes fases:

- Hidrólisis: las moléculas grandes se rompen obteniendo monómeros más simples
- Acidogénesis: los monómeros pasan a ser compuestos intermedios con menor peso molecular
- Metanogénesis: los compuestos intermedios se convierten en su mayoría en CO₂ y CH₄

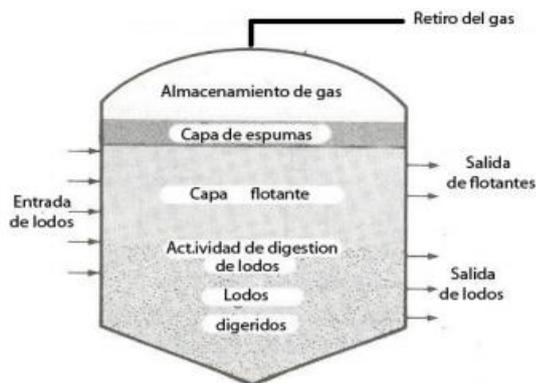


Ilustración 6. Digestor anaerobio

5.2 Combustión

La combustión es la reacción que se da entre el oxígeno y la materia orgánica que va acompañada de un desprendimiento de energía térmica. En este proceso, se quemarán los lodos en una caldera de lecho fluido, consiguiendo temperaturas muy altas. Estas temperaturas se utilizarán para calentar el agua de un ciclo de Rankine, en el cual el agua caliente se turbinará y mediante un transformador se conseguirá energía eléctrica.

Para que la combustión sea efectiva y se obtengan los resultados deseados, se debe de someter a los lodos a una serie de procesos previos a su incineración, que se explicarán a continuación:

- Deshidratación mecánica: mediante la utilización de filtros prensa, se va reduciendo el contenido líquido de los lodos. Tras la finalización de este proceso, el contenido sólido es del 20-25 %. Su coste es bajo por lo que deberemos optimizar al máximo esta etapa, para que el coste de la siguiente sea el menor posible.



Ilustración 7. Dispositivo de deshidratación mecánica

- Secado térmico: una vez realizado el secado mecánico, en el que la humedad del lodo ha disminuido, en esta etapa se utiliza energía térmica para continuar con la reducción de la cantidad de agua de nuestro lodo. Gracias a este proceso, se obtiene un lodo con menor volumen y con mayor PCI (2000-4500 kcal/kg aproximadamente).

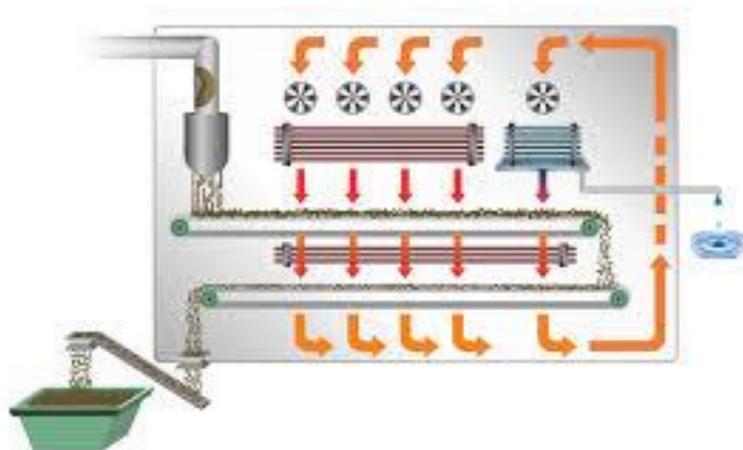


Ilustración 8. Secado térmico

A continuación, se presenta un esquema en el que se resume cual sería la línea de acción en caso de llevar a cabo este proceso, en el que se incluyen procesos intermedios y los resultados obtenidos.

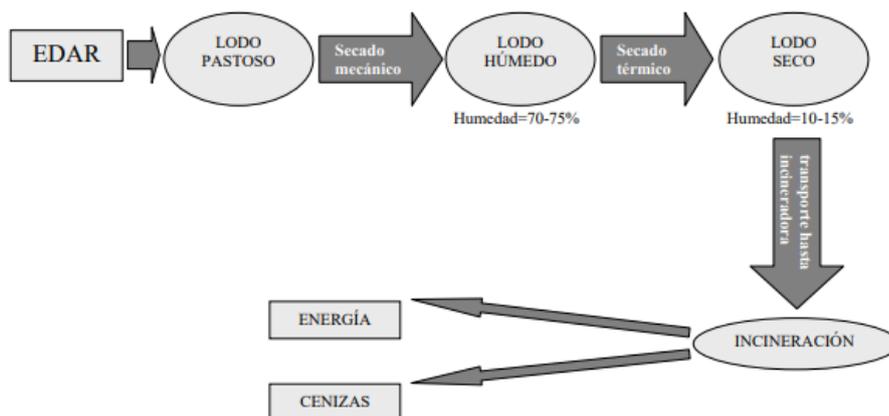


Ilustración 9. Línea de acción del secado térmico

5.3 Compostaje

El compost es un tipo de fertilizante compuesto por materia orgánica, tierra y cal.

En principio, los lodos de EDAR se podrían utilizar como fertilizante simplemente echándolos sobre la tierra, lo cual sería más barato, pero producirían problemas ambientales como por ejemplo el mal olor. Además, su utilización como tal está limitada por ordenanzas gubernamentales, lo cual en su mayoría es un impedimento.

Es por eso por lo que, para poder utilizarlos con tal fin, hay que someterlos a la siguiente serie de procesos que permitirán que cumplan con los requisitos necesarios para ser considerados compost:

- Mezclado: se mezclarán los lodos de EDAR con plantas, madera, hojas...
- Fermentación: se dejará fermentar la mezcla aproximadamente a una temperatura de 70 °C
- Incorporación de caducados: se añadirá al resultado de la fermentación compuestos caducados
- Maduración: se dejará madurar a una temperatura aproximada de 45 °C hasta que las propiedades del resultado sean las deseadas
- Cribado: se tamizará el compost obtenido para facilitar su utilización aparte de para tener una mezcla homogénea
- Almacenamiento: se almacenará en una superficie adecuada para ello, y siempre teniendo en cuenta la altura máxima de almacenamiento

Como podemos observar en los gráficos posteriores, el aumento en materia orgánica que obtenemos al realizar el compostaje es un 6%, lo cual en grandes cantidades de residuos es un aumento considerable, que se traduce en un aumento en las propiedades fertilizantes de los lodos.

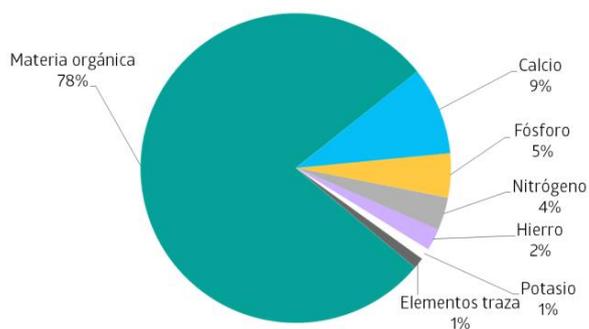
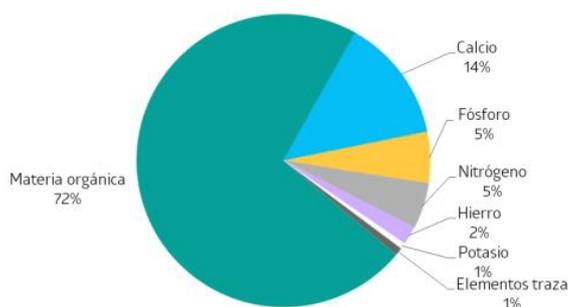


Ilustración 10. Comparación compostaje y aplicación directa en agricultura

6. ALTERNATIVA SELECCIONADA

A continuación, tras haber expuesto las diferentes alternativas que podemos encontrar a la problemática que surge a raíz de los lodos de las EDAR, se presentan las diferentes ventajas y desventajas de cada alternativa mencionada.

6.1 Digestión anaerobia

Ventajas	Desventajas
Eliminación/reducción de malos olores	Gran coste inicial
Facilidad de manejo de los residuos orgánicos	Problemas de seguridad causados por el gas inflamable
Energía limpia y renovable	Lentitud en la puesta en marcha del proceso
Mayor capacidad de carga a tratar	Proceso difícil de manejar
Eliminación de gran parte de sólidos en suspensión volátiles	Poca utilización energética del gas obtenido, sobre todo el CO ₂

Tabla 1. Ventajas y desventajas de la digestión anaerobia

6.2 Combustión

Ventajas	Desventajas
Captación de metales pesados en las cenizas obtenidas	Grandes costes de instalación y mantenimiento de la planta
Reducción del volumen de materia a tratar y de la materia orgánica en ella	Necesidad de personal cualificado para el mantenimiento y explotación
Alta recuperación energética gracias al turbinado	Alta cantidad de procesos necesarios previos a la incineración
Destrucción de presencia de materia patógena, y de compuestos tóxicos	Oposición social

Tabla 2. Ventajas y desventajas de la combustión

6.3 Compostaje

Ventajas	Desventajas
Facilidad en el almacenamiento, uso y transporte	Necesidad de grandes áreas de operación y tratamiento
Alta calidad como fertilizante	Dificultad de gestión por la composición de los lodos
Alternativa muy sencilla	Necesidad de estructurante
Estabilización microbiana	No tiene ningún valor económico

Tabla 3. Ventajas y desventajas del compostaje

Finalmente, tras analizar cada una de las ventajas e inconveniente de las alternativas propuestas, se ha optado por la combustión de los lodos provenientes de la EDAR en una caldera de lecho fluido para su posterior utilización con el fin de obtener energía mediante el turbinado de los gases obtenidos, ya que el mayor inconveniente del proceso es económico.

7. FUNCIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN

7.1 Funcionamiento de la instalación

Como ya se ha mencionado anteriormente, el proceso que se va a llevar a cabo para la valorización energética de los lodos de EDAR es la combustión.

Para comenzar, se quemarán los lodos pretratados en una caldera, una vez los lodos hayan empezado a combustionar y a liberar energía térmica se producirá un intercambio de dicha energía entre los gases producidos por la combustión y el agua del ciclo Rankine que estará colocado adyacente a la caldera.

El ciclo Rankine básico, es un ciclo termodinámico que permite la conversión de energía térmica en energía eléctrica mediante los 4 procesos (dos isoentrópicos y dos isobáricos) a los que se somete al agua.

Los procesos que se dan en la bomba y en la turbina se van a suponer adiabáticos ($Q=0$) y reversibles, mientras que los de la caldera y el condensador se va a suponer que se dan sin ninguna caída de presión. Con estas suposiciones, los procesos a los que el agua es sometida son los siguientes:

- Proceso 1-2: se da en la turbina una expansión isoentrópica, en la que la presión del líquido de trabajo disminuye hasta llegar a la del condensador. El vapor saturado pasa por la turbina y le transmite la energía cinética que contiene al eje, el transformador que está acoplado a la turbina transforma esa energía en energía eléctrica.
- Proceso 2-3: se da en el condensador una transmisión de calor a presión constante, entre el fluido de trabajo y el agua líquida que circula por los tubos del condensador. Gracias a esta transmisión de calor, el fluido de trabajo vuelve al estado inicial ya que ha cedido la energía que le sobraba para volver al estado de líquido saturado ($x=0$).
- Proceso 3-4: se da en la bomba una compresión isoentrópica y adiabática del fluido de trabajo que se encuentra en estado líquido, por lo que la presión aumenta hasta la presión del evaporador (la caldera). Este proceso necesita trabajo, pero comparado con el que obtenemos del proceso, es mucho menor.
- Proceso 4-1: se da en el evaporador, que es un intercambiador de calor que obtiene la energía de la combustión de los gases de los lodos, y la transmite al fluido de trabajo a presión constante. Primero el fluido va aumentando la temperatura hasta llegar a la de saturación (a) y a partir de ahí se convierte en líquido-vapor hasta que se convierte en vapor saturado.

Representando los procesos anteriormente explicados en un diagrama T-s suponiendo unas temperaturas y presiones sin determinar, obtenemos el siguiente gráfico:

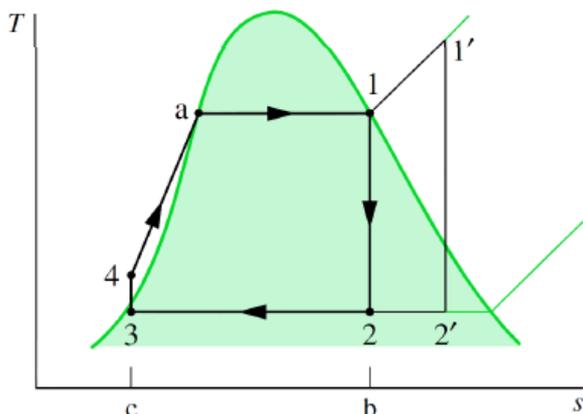


Ilustración 11. Diagrama T-s del Ciclo Rankine básico

7.2 Descripción de los elementos del ciclo Rankine

En el caso de la planta de valorización para los lodos de EDAR se va a utilizar un ciclo de Rankine con una variante: un degasificador. Además, los elementos que compondrán el circuito serán: la caldera, la turbina, el transformador, el condensador y la bomba. A continuación, se puede observar un esquema de la instalación y se procederá al análisis de cada uno de los elementos necesarios:

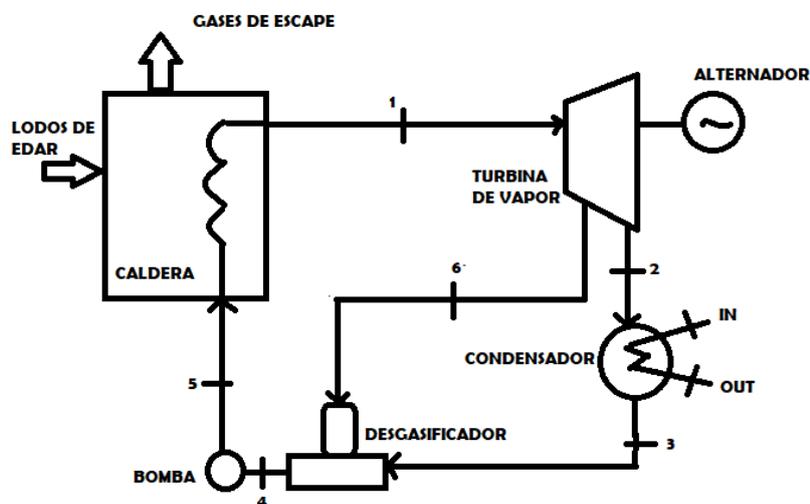


Ilustración 12. Esquema del Ciclo Rankine

7.2.1 Caldera de lecho fluido

La caldera es el dispositivo en el que se da la combustión de los lodos, en este caso analizaremos la caldera de lecho fluido, que es la más utilizada actualmente dadas todas las ventajas que ofrece respecto a los otros tipos de calderas y dado que el resto de las calderas no son adecuadas para nuestro combustible, los lodos de una EDAR.

Según la presión a la que trabaje la caldera se pueden clasificar en dos grandes grupos: de lecho fluido burbujeante (presión atmosférica) y de lecho fluido presurizado (presión mayor a la atmosférica).

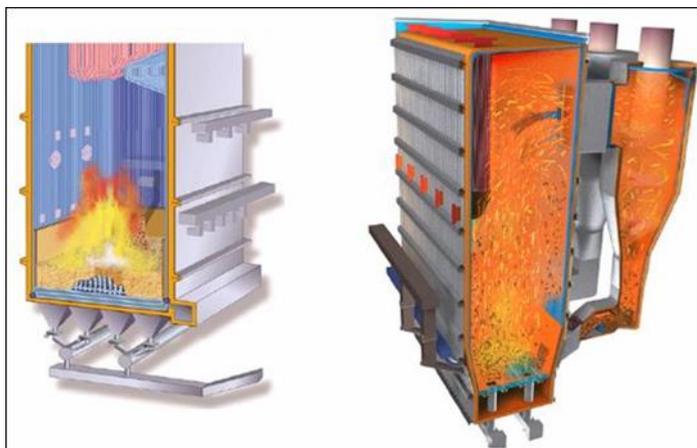


Ilustración 13. Caldera de lecho fluido

La fluidización es un fenómeno en el cual sólidos y fluidos están en contacto de manera que las partículas sólidas quedan suspendidas en el fluido que se mueve hacia arriba. En este proceso, se pueden observar varios estados del lecho.

- Lecho fijo: es el comienzo del proceso, en el que la velocidad del oxígeno inyectado es baja y, por lo tanto, el oxígeno se filtra entre los huecos de la materia sin causar movimiento alguno
- Lecho fluido: cuando la velocidad del oxígeno es lo suficientemente alta como para que la fuerza que ejerce sea mayor que el peso de algunas de las partículas, las partículas empiezan a moverse libremente pero no todas
- Zona crítica: zona turbulenta entre la velocidad a la que empieza la fluidización y a la que todas las partículas están en movimiento
- Transporte neumático: se da cuando la velocidad del oxígeno es muy alta, por lo que causa que todas las partículas que se encuentren en el lecho estén en movimiento

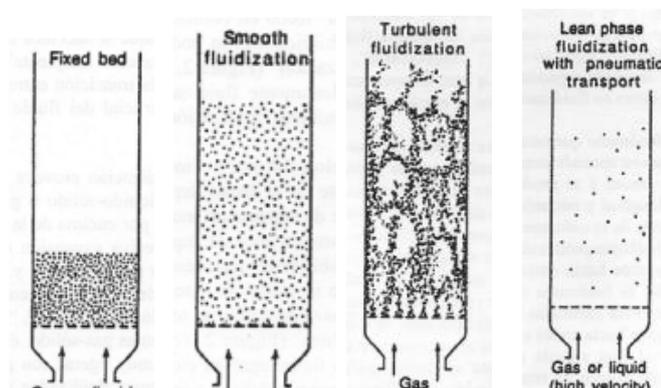


Ilustración 14. Fenómeno de fluidización

En el gráfico inferior se puede observar cómo varían las pérdidas de cargas en el proceso según la velocidad del fluido, expresado en base logarítmica; estando delimitados los estados del lecho por el que pasa durante el proceso. Se observa como en las fases de “lecho fijo” las pérdidas de carga son lineales, mientras que en la de “lecho fluido” son constantes.

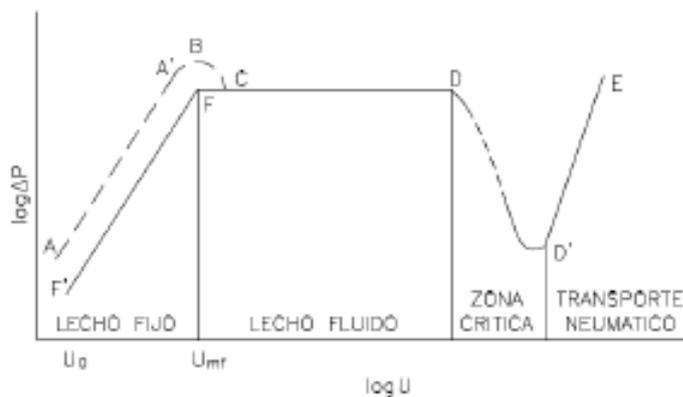


Ilustración 15. Desarrollo de la fluidización

En lo que se refiere a la caldera, se puede dividir en dos partes principales según sus respectivas funciones:

- **Hogar:** es el espacio cerrado de la caldera donde se da la combustión. Consta de una zona plana donde se colocan los lodos a quemar, unas boquillas por donde se introduce el oxígeno en dirección vertical y sentido ascendente y un volumen donde se retienen todos los gases producidos tras la reacción entre los lodos y el oxígeno. La temperatura en el interior del hogar no suele superar los 850°C. Además, las paredes del hogar están refrigeradas para asegurar la vaporización del agua.
- **Zona de recuperación:** se encuentra a la salida de la zona de fluidificación y engloba todos los dispositivos que permiten la recuperación del calor que se consigue con la combustión. De esta zona formarían parte los tubos por los que circula el agua con el que se realizará el intercambio de calor en el ciclo Rankine.

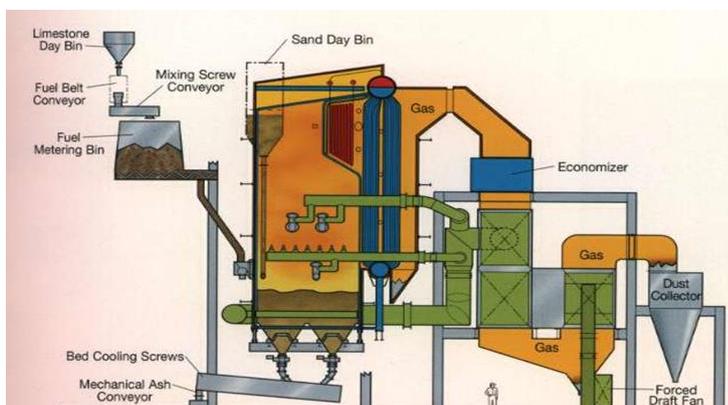


Ilustración 16. Esquema caldera de lecho fluido

Como ya se ha mencionado anteriormente, la caldera de lecho fluido es el tipo de caldera más utilizado en el mercado actual dadas las ventajas que ofrece, que son las siguientes:

- Amplia gama de combustibles utilizables, sobre todo los de bajo poder calorífico
- Reducción de emisiones de SO_2 , gracias a la posibilidad de adición de absorbentes
- Reducción de emisiones de NO_x
- Obtención de cenizas secas, por lo que se evitan las escorias que son indeseables
- Baja temperatura de combustión necesaria
- Coste bajo de mantenimiento
- Alta eficiencia de combustión y alto rendimiento de la instalación

Por otro lado, este tipo de calderas tiene las siguientes limitaciones que habrá que considerar:

- El alto precio y la complejidad del sistema
- El coste del proceso de preparación de los lodos antes de la combustión
- Única viabilidad para plantas que producen más de 70 ton/h.
- Puede presentar problemas de corrosión que han de ser vigilados en la zona de convección

7.2.2 Turbina de vapor

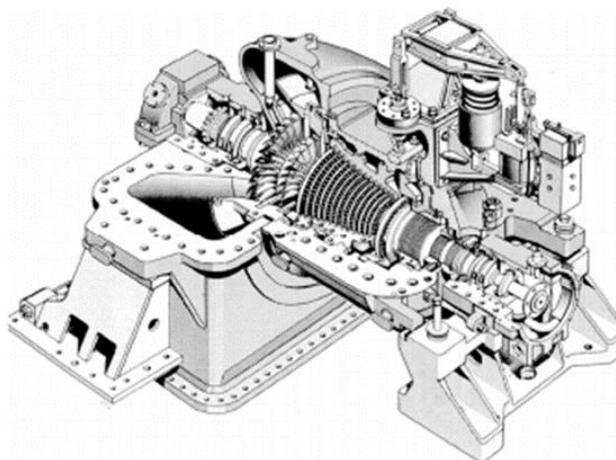


Ilustración 17. Turbina de vapor

Las turbinas de vapor son actualmente unos de los dispositivos más utilizados en la industria dado que de su funcionamiento se obtienen dos grandes beneficios. Por una parte, el gas entra en la turbina a unas condiciones iniciales dadas, pasa por los álabes del dispositivo expandiéndose, y saliendo de la turbina a una temperatura y presión menores que las iniciales. Por otra parte, en el proceso de expansión se libera una energía termodinámica que se transmite a la turbina y se convierte en energía mecánica al pasar el gas por los álabes y hacerlos girar.

En la imagen inferior, se puede ver cuál es la trayectoria que el vapor sigue desde que entra a la turbina hasta que sale y cuáles son los principales elementos que componen la turbina.

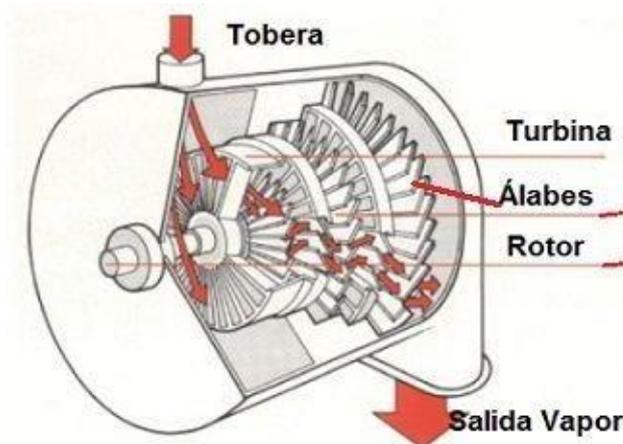


Ilustración 18. Partes de la turbina de vapor

- Rotor:

Es la parte móvil de la turbina y actúa como eje del dispositivo. Normalmente está hecho de acero fundido, ya que es un elemento que va a estar sometido a mucho movimiento y por lo tanto debe ser muy tenaz para el correcto funcionamiento de la turbina.

- Estator o carcasa:

Es la parte fija de la turbina, dentro de ella se encuentran todos los demás elementos que componen el dispositivo.

- Álabes:

Como ya se ha explicado anteriormente, gracias a los álabes se da la transferencia de energía entre el gas y la turbina. El gas empuja los álabes y hace que se muevan, gracias a lo cual obtenemos energía mecánica que posteriormente transformaremos en energía eléctrica. Dentro de la turbina hay dos tipos de álabes: los móviles (se colocan alrededor del eje y se da lugar la expansión gracias a ellos) y los fijos (están amarrados a la carcasa y marcan la trayectoria del gas)

- Cojinetes:

Sobre ellos gira el rotor y son los encargados de soportar el esfuerzo que se genera en la turbina. Es por eso por lo que se desgastan con mucha facilidad y deben ser revisados y sustituidos periódicamente.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la turbina de vapor tiene grandes ventajas, lo que se ve reflejado en la amplitud de campos en la que es utilizada. En este caso se aplica en

una central de biomasa, pero también se puede encontrar en centrales termo solares, nucleares o en plantas de cogeneración. Lo cual refleja la gran importancia de este elemento

7.2.3 Generador

El generador es una de las partes fundamentales de la instalación, ya que se encarga de transformar la energía mecánica de la turbina a la que esta acoplada en energía eléctrica, es decir, es el elemento que permite obtener un beneficio energético del ciclo de Rankine.

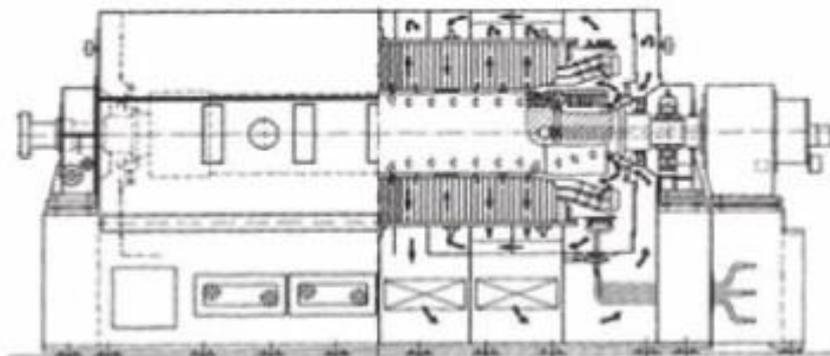


Ilustración 19. Dibujo esquemático de un generador eléctrico

Generalmente el funcionamiento de los generadores se basa en utilizar el movimiento rotativo que genera el vapor cuando empuja los álabes para transformarlo en energía eléctrica. Esta transformación se da gracias a la ley de Faraday que afirma lo siguiente:

“El voltaje inducido en un circuito cerrado es directamente proporcional a la rapidez con que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa una superficie cualquiera con el circuito como borde”.

$$f.e.m (V) = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Donde f.e.m es el voltaje generado, es decir la electricidad que se obtiene; N es el número de vueltas del circuito; Φ es el flujo magnético en Wb (Weber) y t el tiempo.

En cuanto a los elementos principales de un generador, se pueden dividir en dos grandes grupos: el motor, que es la fuente de energía mecánica, que en este caso será la turbina del ciclo Rankine; y el alternador que se encarga de la producción de electricidad. El alternador a su vez se puede dividir en los siguientes elementos:

- Estátor: es la parte fija del alternador y en ella se encuentran las bobinas que generan la electricidad.
- Rotor: es la parte móvil del alternador y gira dentro del estator provocando el campo magnético necesario para la generación de electricidad posterior.
- Carcasa: contiene todos los elementos del generador y los protege del exterior

- Toma a tierra: elemento de seguridad imprescindible en el generador, ya que reduce el peligro en caso de fuga o contacto directo con la tensión
- Elementos auxiliares: permiten el correcto funcionamiento del generador (regulador de la tensión, orificios de ventilación, escobilla, sistemas de lubricación...)

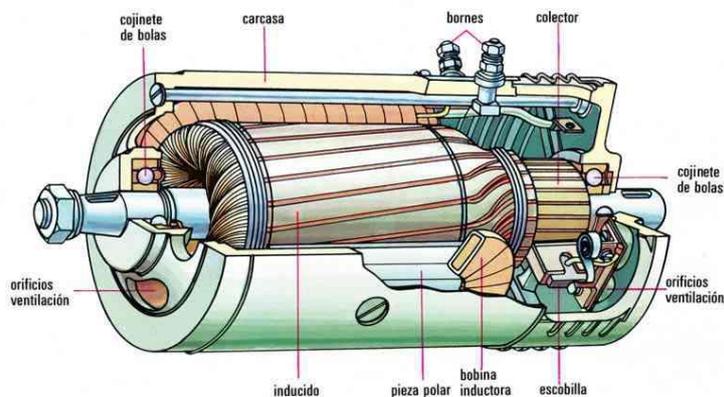


Ilustración 20. Elementos de un generador

Los generadores se pueden clasificar por el número de fases en los que genera y distribuye (monofásico y trifásico) o también por si son síncronos o asíncronos. En el caso de nuestra central de valorización, se va a utilizar un generador síncrono y trifásico ya que son las características más adecuadas para el generador que se necesita.

7.2.4 Condensador

El condensador es un intercambiador de calor que permite el cambio de fase y la reducción de la temperatura de un fluido de trabajo. En el caso del ciclo Rankine, en el condensador introduciremos el vapor proveniente de la turbina y este, cambiará a estado líquido y bajará su temperatura progresivamente desde que entra al condensador hasta que sale. Esto sucederá gracias a que dentro del condensador se dará un intercambio de energía térmica entre el vapor de agua proveniente de la turbina, que se encuentra a una temperatura alta, y el fluido refrigerante, agua, que cuya temperatura es menor que la inicial del vapor de agua.



Ilustración 21. Condensador por fuera y por dentro

Existen varios motivos por los que en un ciclo Rankine se introduce un condensador, el más claro es que gracias a este dispositivo es posible la reutilización del agua del ciclo, ya que si no fuera así supondría un gasto adicional no deseado. Por otra parte, al utilizar un condensador que reduce la presión del fluido de trabajo podemos utilizar una bomba para volver a aumentar la presión a la entrada de la caldera en vez de un compresor, lo cual es más costoso.

En cuanto a la clasificación de los tipos de condensadores, esta se realiza dependiendo del flujo del mismo o de cómo están dispuestos los elementos de este; pero en este caso el tipo más utilizados es el de haz de tubos y coraza.

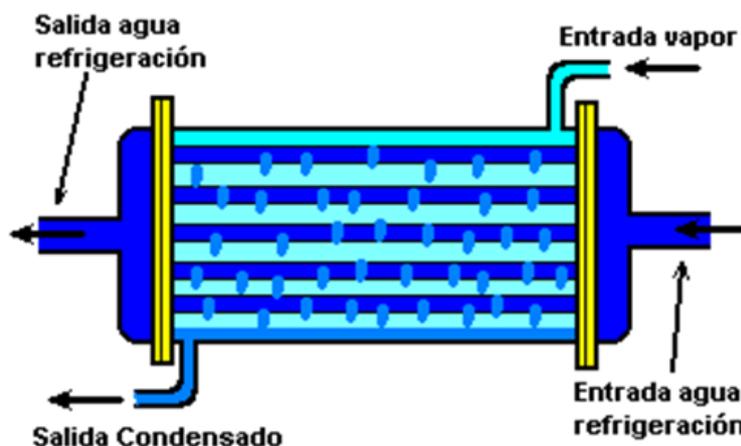


Ilustración 22. Condensador de tubos y coraza

Este intercambiador se compone de dos zonas bien diferenciadas: los tubos en los que se encuentra el vapor que deseamos condensar y el resto del volumen por el que circula el agua, cuyo papel es el de fluido refrigerante. Ya que el vapor se introduce en unos tubos, nunca habrá contacto entre él y el fluido refrigerante, lo cual es beneficioso ya que, si hay una fuga en algún componente, no afectará al ciclo Rankine.

El funcionamiento de este tipo de condensadores es muy sencillo: se introduce el vapor proveniente de la turbina, y dada la diferencia de temperatura que hay entre el vapor y el agua se da el intercambio de calor: desde el vapor a los tubos, y de los tubos al agua. Esta transferencia de calor va acompañada con una reducción en la temperatura del vapor y un cambio de fase de estado gaseoso a estado líquido. Finalmente, y como es lógico el agua sale del condensador a una temperatura mayor.

7.2.5 Desgasificador

El desgasificador es un elemento cuyo objetivo principal es la reducción total del aire que se encuentra dentro del ciclo Rankine y que circula por él libremente. Al tener una central grande, las tuberías no son continuas, sino que necesitan empalmes para poder abarcar la distancia que hay de máquina a máquina. El empalme no está hecho a la perfección, por lo que

el aire, gracias al efecto Venturi, se introduce poco a poco en el circuito mediante los pequeños huecos que hay en los empalmes.

No es una gran cantidad de aire, comparada con la de agua que circula por el circuito, pero puede crear grandes problemas como, por ejemplo: cavitación, golpe de ariete, ruido, fuerzas mecánicas no deseadas y oxidación de las tuberías.

Es por esto por lo que después del condensador se coloca el desgasificador, que está compuesto por dos depósitos: uno tumbado y otro vertical. El principio del funcionamiento del desgasificador es el siguiente:

- En la turbina, se realiza una extracción de un porcentaje del caudal que se encuentre aproximadamente a 3 bar
- Esa extracción va directamente al desgasificador, en donde se mezcla con el agua líquida que sale del condensador
- Al mezclarse, la mezcla llega a 105^a aproximadamente, que es la temperatura de disociación del agua con el aire, por lo que en la parte de debajo del desgasificador encontraremos el agua en estado líquido mientras que en la de arriba estará todo el aire que había en la mezcla
- Mediante la apertura del purgador, el aire de la mezcla se extrae del ciclo para que el único elemento que haya en el circuito sea agua



Ilustración 23. Desgasificador

7.2.6 Bomba de alimentación:

La bomba de alimentación de la caldera es un dispositivo que se encarga de aumentar la presión del agua en estado líquido que sale del condensador, con el fin de que ésta sea suficientemente alta como para que no haya

Para las centrales que producen electricidad a partir de la biomasa, las bombas de alimentación que se suelen utilizar son de tipo sección anular ya que trabajan a altas presiones. Sin embargo, el tamaño de la bomba y su presión de diseño dependen directamente del tipo de central en la que se vaya a utilizar y de la potencia de producción eléctrica de dicha central.



Ilustración 24. Bomba de alimentación

8. DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA

A continuación, se va a realizar el dimensionamiento de la planta de valorización energética de los lodos de EDAR. Para ello, se estudiarán las principales características de esta y se aproximarán cuáles serán los parámetros principales de la instalación.

8.1 Análisis de la composición de los lodos

Con el fin de conocer cuál será la capacidad de producción de energía que se obtendrá gracias a la incineración de los lodos, es importante saber cuáles son las características de estos, ya que cuanto más información tengamos de los lodos, podremos manejarlos de manera que saquemos el mayor provecho posible.

Por una parte, es indispensable el conocimiento de los elementos que componen los lodos ya que eso afecta en dos aspectos: cuanto mayor materia orgánica, mayor poder calorífico y cuanto menor humedad mayor facilidad de incineración. Por otra parte, también es de relevancia el hecho de que puedan contener materiales nocivos que deban ser controlados minuciosamente. Por ejemplo, la presencia de azufre en los lodos necesitaría una observación especial ya que el azufre es altamente corrosivo.

PARAMETRO	RESULTADO
Resultados sobre materia húmeda	
pH	6,45
Conductividad (mmh/cm)	2,55
Humedad (%)	83
Resultados sobre materia seca	
Materia Orgánica (%) (calcinación)	65,7
Nitrógeno (%)	5,37
Fósforo (%)	0,27
Potasio (%)	0,37
Sodio (%)	0,32
Calcio (%)	4,03
Magnesio (%)	0,54
Cobre (ppm)	80
Manganeso(ppm)	437
Hierro (%)	1,05
Cinc (ppm)	420
Boro(ppm)	26
Cadmio (ppm)	1,1
Cromo(ppm)	289
Níquel (ppm)	21
Plomo (ppm)	43
Mercurio (ppm)	0,21

Tabla 4. Análisis de los residuos orgánicos de los lodos de una EDAR

Por otra parte, es importante el análisis del poder calorífico de los lodos que vamos a incinerar ya que cuanto mayor sea este, mayor electricidad conseguiremos en el proceso. En la tabla inferior, se observan cuáles son los poderes caloríficos inferiores de 5 tipos de lodos, cada uno de un origen diferente.

- Lodo 1: procedente de una EDAR urbana
- Lodo 2: procedente de una EDAR de industria papelera.
- Lodo 3: procedente de una EDAR de una industria de curtidos.
- Lodo 4: procedente de una EDAR de una industria textil.
- Lodo 5: procedente de una EDAR de una industria láctea.

	PCI (kJ/kg)	
	Muestra húmeda	Muestra seca
Lodo 1	2400,03	12452,81
Lodo 2	4919,73	14678,03
Lodo 3	3008,89	15362,29
Lodo 4	1474,79	11078,63
Lodo 5	2011,79	6406,35

Tabla 5. PCI de diferentes lodos

El lodo del que se va a llevar a cabo el estudio es el lodo 2 ya que los lodos normalmente tienen un PCI aproximado de 5000 kJ/kg, por lo que es el PCI que utilizaremos a lo largo de todo el estudio de la planta.

8.2 Dimensionamiento de la planta

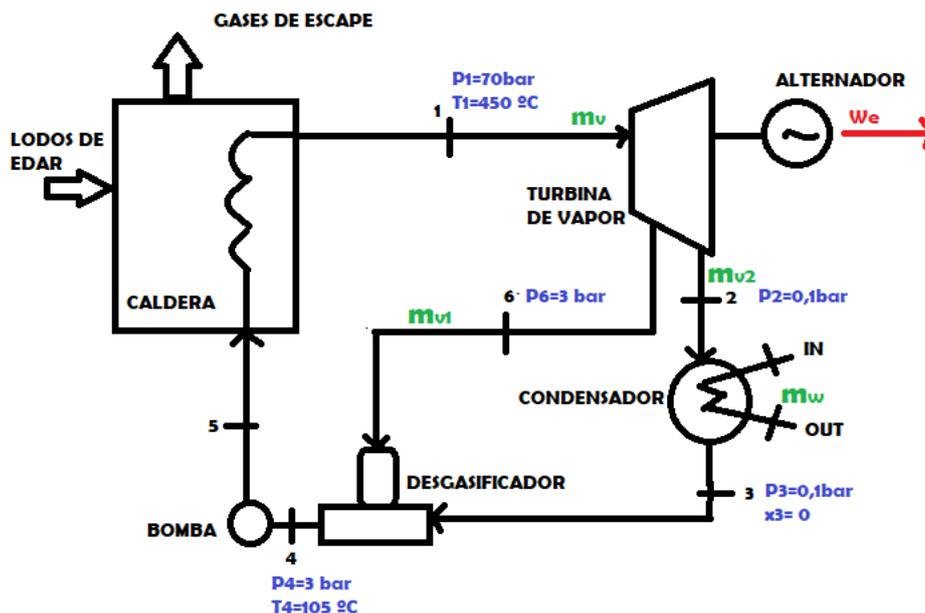


Ilustración 25. Esquema de la instalación con datos

Para comenzar con el dimensionamiento de la planta, tenemos los siguientes datos de partida.

Datos del proceso:

El dato utilizado como masa de lodos tratada es la cantidad aproximada de lodos obtenidos en la EDAR de Galindo anualmente.

Masa de lodos tratada	m_{lodos}	85.000 t/año
Tiempo de trabajo de la planta	t	8.000 h
PCI de los lodos	PCI	5000 KJ/kg

Tabla 6. Datos del proceso

Datos de diseño:

Estado 1	Desgasificador:	Agua del condensador:	Condensador:
$P_1=70$ bar	$P_{\text{DESG}}=3$ bar	$T_{\text{IN}}=17^\circ\text{C}$	$P_{\text{COND}}=0,1$ bar
$T_1=450$ °C	$T_{\text{DESG}}=105$ °C	$T_{\text{OUT}}=22^\circ\text{C}$	

Tabla 7. Datos de diseño

Datos de los equipos:

Son datos que vienen estipulados por los fabricantes de los equipos y se basan básicamente en los rendimientos de cada uno de ellos.

Rendimiento:		
Caldera	η_c	0,9
Isoentrópico (de la turbina)	η_s	0,83
Mecánico (del acoplador)	η_m	0,9
Eléctrico (del generador)	η_e	0,97
Bomba	η_b	0,6

Tabla 8. Datos de los equipos

Una vez tengamos los datos necesarios se procederá a realizar el dimensionamiento de la planta, que se basará en realizar en cada uno de los elementos de la instalación los balances de: masa, energía, entalpía y entropía.

Para comenzar, en base a la producción anual de lodos y al tiempo de operación de la planta; obtendremos el flujo másico de lodos que se incinerarán en la caldera.

Flujo másico de lodos:

$$\dot{m}_{\text{lodos}} = \frac{85.000.000 \frac{\text{kg}}{\text{año}}}{8.000 \frac{\text{h}}{\text{año}} \cdot 3600 \text{ s}} = 2.95 \text{ kg/s}$$

A continuación, se realizará el cálculo de las variables termodinámicas de cada estado.

Estado 1:

Se utilizarán las tablas termodinámicas junto con los valores de P1 y T1.

Estado 1	$h_1 = 3335,83 \text{ kJ/kg}$	$s_1 = 6,752 \text{ kJ/kg K}$
----------	-------------------------------	-------------------------------

Estado 2':

Basándonos en que el estado 2' sería el resultado de que el proceso de la turbina fuera isoentrópico, obtenemos la entropía del estado 2', que será igual que la del estado 1. Al conocer cuál es la presión del punto 2' (la del condensador) y su entropía obtenemos la entalpía:

Estado 2'	$h_{2'} = 2138,66 \text{ kJ/kg}$	$s_{2'} = 6,752 \text{ kJ/kg K}$
-----------	----------------------------------	----------------------------------

Estado 2:

Se utilizará el rendimiento isoentrópico de la turbina, y se obtendrá el valor de la entalpía del estado 2.

$$\eta_s = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

Estado 2	$h_2 = 2342,17 \text{ kJ/kg}$	$s_2 = 7,387 \text{ kJ/kg K}$
----------	-------------------------------	-------------------------------

Estado 3:

Como datos se tiene que la presión del estado 3 es la del condensador y que dicho estado es un líquido saturado, por lo que el título del estado será 0. Con esto obtendremos la entalpía.

Estado 3	$h_3 = 191,83 \text{ kJ/kg}$	$s_3 = 0,6498 \text{ kJ/kg K}$
----------	------------------------------	--------------------------------

Estado 4:

Del estado 4 conocemos la temperatura, y al tratarse de un líquido incompresible, el cálculo de la entalpía de este estado se reduce a multiplicar su temperatura por el coeficiente de calor (cp)

Estado 4	$h_4 = 438,9 \text{ kJ/kg}$
----------	-----------------------------

Estado 5:

El estado 5 es la salida de una bomba, lo que implicará que a la salida y a la entrada tendremos la misma entalpía. Por lo que la entalpía de 5 será igual a la del estado 4.

Estado 5	$h_5 = 438,9 \text{ kJ/kg}$
----------	-----------------------------

Estado 6':

Basándonos en que el estado 6' sería el resultado de que el proceso de la turbina fuera isoentrópico, obtenemos la entropía del estado 6', que será igual que la del estado 1. Al conocer cuál es la presión del punto 6' (la del desgasificador) y su entropía obtenemos la entalpía:

Estado 6'	$h_{2'} = 2627,93 \text{ kJ/kg}$	$s_{6'} = 6,752 \text{ kJ/kg K}$
-----------	----------------------------------	----------------------------------

Estado 6:

Se utilizará el rendimiento isoentrópico de la turbina, y se obtendrá el valor de la entalpía del estado 6.

$$\eta_s = \frac{h_1 - h_6}{h_1 - h_{6s}}$$

Estado 6:	$h_6 = 2698,74 \text{ kJ/kg}$
-----------	-------------------------------

Caldera:

$$\eta_c = \frac{\dot{m}_v \cdot (h_1 - h_5)}{m_{\text{Iodos}} \cdot \text{PCI}} = \frac{\dot{m}_v \cdot (3335,83 - 438,9)}{2,95 \cdot 5000}$$

$$\dot{m}_v = 4,59 \text{ kg/s}$$

Turbina de vapor + alternador:

$$W_e = \dot{m}_v \cdot (h_1 - h_2) \cdot \eta_m \cdot \eta_e = 4,59 \cdot (3335,83 - 2342,17) \cdot 0,9 \cdot 0,97$$

$$W_e = 3981,66 \text{ kW}$$

$$E_e = W_e \cdot n^{\circ} \text{ de horas} = 3981,66 \cdot 8000 \text{ (KWh)}$$

$$E_e = 31,85 \text{ GWh}$$

Condensador:

$$\dot{m}_v \cdot (h_2 - h_3) = \dot{m}_w \cdot c_p (T_{in} - T_{out})$$

$$4,59 \cdot (2342,17 - 191,83) = \dot{m}_w \cdot 4,18 \cdot (22 - 17)$$

$$\dot{m}_w = 472,25 \text{ kg/s}$$

Desgasificador:

$$\dot{m}_v = \dot{m}_{2'} + \dot{m}_6$$

$$\dot{m}_{2'} \cdot h_3 + \dot{m}_6 \cdot h_6 = \dot{m}_v \cdot h_4$$

$$(\dot{m}_v - \dot{m}_6) \cdot h_3 + \dot{m}_6 \cdot h_6 = \dot{m}_v \cdot h_4$$

$$(4,59 - \dot{m}_6) \cdot 191,83 + \dot{m}_6 \cdot 2698,74 = 4,59 \cdot 438,9$$

$$\dot{m}_6 = 0,45 \text{ kg/s}$$

Bomba de agua de alimentación:

$$W_{bomba} = \dot{m}_v \int_{P_4}^{P_5} -v \cdot dp = -\dot{m}_v \cdot v \cdot (P_5 - P_4)$$

$$W_{bomba_teorico} = -0,308 \cdot 10^5 \frac{\frac{N}{m^2}}{1 \text{ bar}} \cdot \frac{1 \text{ kJ}}{1000 \text{ J}} = 30,753 \text{ KW}$$

$$W_{bomba} = \frac{W_{bomba_teorico}}{\eta_{bomba}}$$

$$W_{bomba} = 51,255 \text{ KW}$$

Los cálculos anteriores se han realizado manualmente, sin embargo, se han llevado a cabo también mediante el programa informático EES (Engineering Equation Solver) y se ha comprobado que se han hecho correctamente. La programación realizada con el EES se puede encontrar en el Anexo I.

En la siguiente tabla se puede ver cuáles son los parámetros más importantes de la planta.

Masa de lodos:	\dot{m}_{lodos}	2,95 kg/s
Masa de vapor:	\dot{m}_{vapor}	4,661 kg/s
Masa de vapor extraído para el desgasificador:	$\dot{m}_{vapor \text{ extraido}}$	0,4592 kg/s
Masa de agua del condensador:	\dot{m}_{agua}	470,6 kg/s
Potencia eléctrica producida:	\dot{W}_{elect}	4008 KW
Energía eléctrica producida:	\dot{E}_{elect}	32,063 GWh
Potencia de la bomba:	\dot{W}_{bomba}	52,04 KW

Tabla 9. Resultados obtenidos

8. ESTUDIO ECONÓMICO:

Para comenzar a realizar el estudio económico, se va a estimar cual debe ser la inversión inicial de la instalación de valorización energética de los lodos. Esta inversión depende de la potencia de la planta y se basa prácticamente en la compra de los equipos necesarios para llevar a cabo la operación de valorización y el acondicionamiento de estos para su funcionamiento. Por lo que para una planta de 4000 KW (aproximadamente) la inversión necesaria se desglosa de la siguiente manera:

	Precio
Caldera de lecho fluido	5.360.000,00 €
Turbina de vapor	4.240.000,00 €
Equipos auxiliares	1.600.000,00 €
Control automático	400.000,00 €
Montaje mecánico	960.000,00 €
Montaje eléctrico	1.000.000,00 €
Obra civil	1.840.000,00 €
Inversión total:	15.400.000,00 €

Tabla 10. Desglose de la inversión inicial

Por otro lado, se va a calcular cual es el ahorro anual que se consigue gracias a la planta de EDAR. Este ahorro dependerá de los beneficios y los gastos que produce la planta.

Ingresos:

Para realizar la estimación de los ingresos anuales que tendremos gracias a la instalación, supondremos que la planta de EDAR que estudiamos tiene una potencia contratada de 2,5 MW. Esto supone que como gracias a la valorización energética de los lodos obtenemos 4 MW, los 1,5 MW anuales de más que se producen serán vendidos en el mercado energético.

Es por esto por lo que los ingresos de la planta se dividen en dos:

- el dinero que se ahorra al autoabastecer la planta con la energía de la valorización, cuyo precio de ahorro suponemos que es 100 €/MWh (precio medio que se paga a una empresa de electricidad por cada MWh)
- el dinero que ganamos al vender la energía sobrante, cuyo precio de venta suponemos que es 50€/MWh (precio medio del pool la energía del año 2018)

$$I = 2,5 \frac{MW}{año} \cdot 8000 \text{ horas} \cdot 100 \frac{€}{MWh} + 1,5 \frac{MW}{año} \cdot 8000 \text{ horas} \cdot 50 \frac{€}{MWh}$$

$$I = 2.600.000 \text{ €/año}$$

Gastos:

Los gastos que se producen en una planta de valorización energética suelen ser gastos de operación y mantenimiento y su valor para una planta de la potencia requerida (4 MW) se estima que son aproximadamente:

$$G = 1.000.000 \text{ €/año}$$

Ahorro (ingresos netos):

El ahorro anual se obtendrá como la diferencia entre los ingresos y los gastos.

$$A = 1.600.000 \text{ €/año}$$

Finalmente, y una vez sepamos cual es la inversión inicial y necesaria para llevar a cabo la instalación de la planta, y el beneficio neto que obtenemos anualmente; se procederá al cálculo del tiempo de retorno simple.

El tiempo de retorno simple o “payback” es el tiempo que se tarda en recuperar el dinero invertido y se calcula dividiendo el dinero invertido entre el beneficio anual.

Tiempo de retorno simple:

$$TRS = \frac{\text{Inversión}}{\text{Ahorro}} = 9,625 \text{ años}$$

A continuación, se adjunta una tabla en la que se observa la relación que hay entre el dinero invertido, las ganancias, los gastos anuales y el dinero que queda por amortizar en el transcurso de los años.

	Ahorro	Dinero por amortizar
Año 0	----	15.400.000,00 €
Año 1	1.600.000,00 €	13.800.000,00 €
Año 2	1.600.000,00 €	12.200.000,00 €
Año 3	1.600.000,00 €	10.600.000,00 €
Año 4	1.600.000,00 €	9.000.000,00 €
Año 5	1.600.000,00 €	7.400.000,00 €
Año 6	1.600.000,00 €	5.800.000,00 €
Año 7	1.600.000,00 €	4.200.000,00 €
Año 8	1.600.000,00 €	2.600.000,00 €
Año 9	1.600.000,00 €	1.000.000,00 €
Año 9,625	1.000.000,00 €	0,00 €

Tabla 11. Desglose del payback

9. CRONOGRAMA:

A continuación, se llevará a cabo la explicación de cuál es el desarrollo de los procesos que se deben dar a la hora de realizar un proyecto que implique la implantación de una planta de valorización energética de este tipo.

Para exponer el desarrollo de los procesos necesarios para el proyecto se utilizará un diagrama de Gantt que es una herramienta gráfica gracias a la cual se puede visualizar de manera muy sencilla cada una de las tareas a realizar durante el proyecto y su tiempo de realización necesario.

	Hitos	Tiempo	
H.1	Ingeniería básica	3 meses	
H.2	Ingeniería del detalle		15 meses
H.3	Compra de equipos		14 meses
H.3	Montaje mecánico		5 meses
H.5	Montaje eléctrico		3 meses
H.6	Puesta en marcha		3 meses
	Proyecto	26 meses	

Ilustración 26. Diagrama de Gantt

En el diagrama de Gantt anterior, se pueden observar seis hitos:

- Ingeniería básica: realizada por un pequeño grupo de ingenieros, se establecen cuáles son los pilares básicos del proyecto (planos, características principales).
- Ingeniería del detalle: realizada por un gran número de ingenieros, se concretan cómo se va a llevar a cabo el proyecto y los detalles minuciosos del mismo.
- Compra de equipos: una vez se tengan todas las características del proyecto y se sepa cuáles son los elementos necesarios, se realiza la orden de compra de estos.
- Montaje mecánico: según se vayan recibiendo los elementos de la instalación se van colocando y armando.
- Montaje eléctrico: consta del acoplamiento eléctrico de cada uno de los elementos montados mecánicamente
- Puesta en marcha: se realizan todas las pruebas necesarias que confirmen que la instalación está lista para entrar en funcionamiento.

Finalmente, y tras realizar el diagrama de Gantt conociendo las características y tareas a realizar en cada hito, se concluye que el tiempo necesario aproximado para la realización completa de la instalación de una planta de valorización energética es de 26 meses, es decir, dos años y dos meses.

10. CONCLUSIONES:

Como conclusión principal de este trabajo se puede destacar la gran utilidad energética que se le puede dar a un residuo no deseado y tan común como pueden ser los lodos de una EDAR. Además de producir energía, se contribuye a la reducción de producción de contaminación ya que se están incinerando residuos contaminantes sin emitir apenas gases nocivos.

Por una parte, se debe mencionar que en el trabajo realizado se estarían reutilizando los residuos anuales producidos por la planta (8,5 toneladas anuales) y se valorizan con la implantación de una planta que consta de un ciclo Rankine que necesita aproximadamente 470 kg/s de agua para su funcionamiento. Gracias a la instalación de esta planta se obtendrían 4 MW de energía a partir de un residuo que a priori es inútil e indeseado.

Por otra parte, esta instalación necesita una alta inversión inicial (15,4 millones de euros) ya que consta de una serie de elementos de alto coste. Sin embargo, el tiempo de recuperación de esta inversión es relativamente bajo (9,625 años) además de que los beneficios de la planta son inmediatos una vez esta se ponga en marcha.

Como todo proyecto, tiene un plazo de realización en el cual se llevarán a cabo todas las tareas necesarias para completar el proyecto. Aproximadamente es de dos años y 2 meses, un tiempo más que asequible para un proyecto de tal magnitud.

Para concluir, la conclusión de este trabajo es que la instalación de una planta de valorización energética de los lodos de EDAR mediante incineración es una alternativa más que interesante tanto para industrias como para los consorcios de aguas. Esto se debe a que además de producir un beneficio económico, se obtienen muchos ambientales entre los que se encuentran la reducción de la emisión de gases nocivos y la eliminación de residuos contaminantes. Además, estos beneficios contribuyen a la preservación y cuidado del planeta, lo cual está a la orden del día actualmente.

11. BIBLIOGRAFÍA:

Introducción:

<https://www.consilium.europa.eu/es/policies/climate-change/>

<https://www.theguardian.com/environment/2011/mar/11/kyoto-protocol>

https://www.foronuclear.org/en_2010/9_01.htm

https://www.elespanol.com/ciencia/ecologia/20151106/77242315_0.html

Funcionamiento de una EDAR:

http://www.lis.edu.es/uploads/967d742f_455b_4bd0_a29f_438968130ea1.pdf

<http://alianzaporelagua.org/documentos/MONOGRAFICO3.pdf>

Alternativas:

- Digestión anaerobia:

https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Digestores_Anaerobios_A2007_0d62926d.pdf

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/hammeken_a_am/capitulo8.pdf

<https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/digestion-anaerobia-de-fangos-de-edar-problemas-y-soluciones>

- Combustión

<http://catedramln.unizar.es/files/conferencias/lodos2013/Palacios.pdf>

http://www.premioconama.org/conama9/download/files/CTs/2504_FColomer.pdf

<http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/30/lodos-de-depuradoras/valorizacion/129/tratamiento-de-deshidratacion-y-secado-termico.html>

- Compostaje

http://www.conama.org/conama/download/files/conama2016/STs%202016/1998972205_ppt_OHerrero.pdf

Alternativa seleccionada:

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/100168/S%C3%81EZ%20-%20Dise%C3%B1o%20de%20un%20reactor%20anaerobio%20para%20la%20digesti%C3%B3n%20de%20fangos.pdf?sequence=1>

Descripción de la planta:

- Ciclo Rankine

Santiago García Garrido. *Centrales termoeléctricas de biomasa*. Primera edición. Renovetec, 2012.

- Caldera

<https://joseangelbecerra.com/2017/09/01/calderas-de-vapor-y-centrales-termicas-de-biomasa/>

- Turbina de vapor

<http://www.cicloscombinados.com/turbinasdevapor.html>

<http://www.energiza.org/anteriores/energizadiciembre2011.pdf>

- Generador

Santiago García Garrido. *Fundamentos técnicos de los ciclos combinado*. Primera edición. Renovetec, 2012.

http://opex-energy.com/eolica/generador_sincrono_y_asincrono.html

<http://www.ventageneradores.net/blog/como-funciona-un-generador-electrico/>

- Condensador

<https://ingenieromarinero.com/intercambiadores-de-calor/#.XNb7n44zbIU>

<http://www.cicloaguavapor.com/condensador>

- Bomba de alimentación

<https://www.sulzer.com/es-es/shared/applications/2017/04/25/13/47/boiler-feed-pump-for-biomass-waste>

Cronograma:

<https://catedra.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/sispot/Libros%202007/libros/et/et-03/et-036/et-036.htm>

ANEXO I: DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA CON EES

"Datos del proceso"

$m_{\text{lodos}}=2,95 \text{ {kg/s}}$
 $t=8000 \text{ {h}}$
 $PCI=5000 \text{ {kJ/kg}}$
 $v=0,001 \text{ {m}^3/\text{kg}}$

"Datos diseño"

$T_{\text{in}}=17$
 $T_{\text{out}}=22$

"Datos de fabricación"

$n_c=0,9$
 $n_s=0,83$
 $n_m=0,9$
 $n_e=0,97$
 $n_b=0,6$

"Estado 1 "

$P[1]=70$
 $T[1]=450$
 $h[1]=\text{enthalpy}(\text{water};T=T[1];P=P[1])$
 $s[1]=\text{entropy}(\text{water};T=T[1];P=P[1])$

"Estado 2s"

$P[0]=0,1$
 $s[0]=s[1]$
 $h[0]=\text{enthalpy}(\text{water};P=P[0];s=s[0])$

"Estado 2"

$P[2]=0,1$
 $n_s=(h[1]-h[2])/(h[1]-h[0])$
 $s[2]=\text{entropy}(\text{water};P=P[2];h=h[2])$

"Estado 3"

$P[3]=0,1$
 $x[3]=0$
 $h[3]=\text{enthalpy}(\text{water};P=P[3];x=x[3])$
 $s[3]=\text{entropy}(\text{water};P=P[3];x=x[3])$

"Estado 4"

$T[4]=105$
 $P[4]=3$
 $h[4]=4,18 \cdot T[4]$
 $s[4]=\text{entropy}(\text{water};T=T[4];P=P[4])$

"Estado 5"

$h[5]=h[4]$
 $P[5]=70$
 $s[5]=\text{entropy}(\text{water};P=P[5];h=h[5])$

"Estado 6s"

$$\begin{aligned}
 P[7] &= 3 \\
 s[7] &= s[1] \\
 h[7] &= \text{enthalpy}(\text{water}; P=P[7]; s=s[7])
 \end{aligned}$$

"Estado 6"

$$\begin{aligned}
 P[6] &= 3 \\
 n_s &= (h[1] - h[6]) / (h[1] - h[7]) \\
 s[6] &= \text{entropy}(\text{water}; P=P[6]; h=h[6])
 \end{aligned}$$

"Masa de vapor generada en la caldera de lecho fluido"

$$n_c = (m_v * (h[1] - h[5])) / (m_{\text{lodos}} * \text{PCI})$$

"Trabajo generado en la turbina"

$$\begin{aligned}
 W &= m_v * (h[1] - h[0]) * n_s * n_m * n_e \\
 W_e &= W * 8000 / 1000
 \end{aligned}$$

"Masa de agua del condensador"

$$m_v * (h[2] - h[3]) = m_w * 4,18 * (T_{\text{out}} - T_{\text{in}})$$

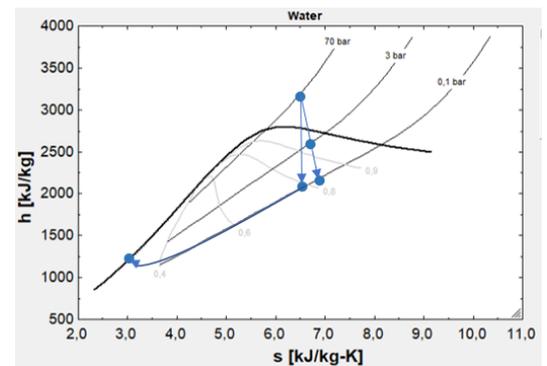
"Masa extraída de la turbina para el desgasificador"

$$\begin{aligned}
 m_{v2} * h[3] + m_{v1} * h[6] &= m_v * h[4] \\
 m_v &= m_{v2} + m_{v1}
 \end{aligned}$$

"Trabajo necesario para la bomba"

$$\begin{aligned}
 W_{b_teorica} &= m_v * v * (P[5] - P[4]) * (10^5) * (1/1000) \\
 W_{b_real} &= W_{b_teorica} / n_b
 \end{aligned}$$

Sort	P _i	T _i	h _i	s _i	X _i
[0]	0,1		2100	6,633	
[1]	70	450	3287	6,633	
[2]	0,1		2302	7,265	
[3]	0,1		191,8	0,6493	0
[4]	3	105	438,9	1,363	
[5]	70		438,9	1,341	
[6]	3		2700	6,929	
[7]	3		2579	6,633	



$$m_{\text{lodos}} = 2,95 \text{ [kg/s]}$$

$$m_{v2} = 4,201 \text{ [kg/s]}$$

$$n_c = 0,9 \text{ [-]}$$

$$n_s = 0,83 \text{ [-]}$$

$$T_{\text{in}} = 17 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$W = 4008 \text{ [KW]}$$

$$W_e = 32063 \text{ [KWh]}$$

$$m_v = 4,661 \text{ [kg/s]}$$

$$m_w = 470,6 \text{ [kg/s]}$$

$$n_e = 0,97 \text{ [-]}$$

$$\text{PCI} = 5000 \text{ [kJ/kg]}$$

$$T_{\text{out}} = 22 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$W_{b_real} = 52,04 \text{ [KW]}$$

$$m_{v1} = 0,4592 \text{ [kg/s]}$$

$$n_b = 0,6 \text{ [-]}$$

$$n_m = 0,9 \text{ [-]}$$

$$t = 8000 \text{ [h]}$$

$$v = 0,001 \text{ [m}^3\text{/kg]}$$

$$W_{b_teorica} = 31,23 \text{ [KW]}$$