



**Universidad  
Zaragoza**

# Proyecto Fin de Carrera Memoria

***Estudio para la valorización energética de  
fangos y predimensionado de un digestor  
anaerobio en la EDAR de Barbastro (Huesca)***

**Especialidad**

Ingeniería Técnica Mecánica

**Autor**

Luis Ballarín Teres

**Director**

Eva María Llera Sastresa

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza (EINA)

Septiembre 2013



## **Acrónimos:**

- **EDAR:** Estación Depuradora de Aguas Residuales
- **DQO:** Demanda Química de Oxígeno
- **DBO:** Demanda Biológica de Oxígeno
- **PCI:** Poder Calorífico Inferior
- **PEC:** Proyecto de Ejecución Contractual
- **PEM:** Presupuesto de Ejecución Material
- **TR:** Tasa de Retorno
- **VAN:** Valor Actual Neto

## Índice

<b>1. Título y objeto del proyecto.....</b>	<b>9</b>
1.1 Introducción .....	9
1.2 Localización de la instalación .....	9
1.3 Objetivos del proyecto .....	9
<b>2. Valorización energética y económica de los Fangos .....</b>	<b>10</b>
2.1 Descarga a vertederos.....	11
2.2 Uso en plantas agrícolas y de compostaje .....	12
2.3 Incineración de lodos .....	14
2.4 Digestión Anaerobia de fangos .....	16
<b>3. Estudio Técnico para la instalación de un Digestor anaerobio. ....</b>	<b>19</b>
3.1 Alcance del estudio Técnico .....	19
3.2 Situación actual de funcionamiento de la Planta depuradora.....	20
3.2.1 Datos técnicos y de funcionamiento de la EDAR .....	20
3.2.2 Instalaciones y funcionamiento de la depuradora.....	22
3.2.3 Análisis de costes y Consumos Energéticos .....	31
3.2.4 Destino final de lodos.....	34
3.3 Digestión anaerobia .....	35
3.3.1 Definición y tipos de digestión .....	35
3.3.2 Fases del proceso .....	37

3.3.3 Factores influyentes en el proceso de digestión .....	39
3.3.4 Tipos de digestores.....	42
3.4 Dimensionado del digester .....	45
3.4.1 Digestor seleccionado. ....	45
3.4.2 componentes de la instalación y funcionamiento .....	46
3.4.3 Cálculos realizados y dimensionamiento .....	49
3.5 Producción de Biogás en la instalación .....	56
3.5.1 Caudal de biogás generado y propiedades .....	56
3.5.2 instalaciones, limpieza y almacenaje del biogás. ....	61
3.6 Producción de electricidad y aprovechamiento de calor .....	63
3.6.1 motores y sistema de cogeneración .....	63
3.6.2 Producción eléctrica diaria y aprovechamiento térmico .....	68
3.7 Efluente del digester .....	70
3.8 equipamiento de la instalación. ....	71
<b>4. Estudio Económico .....</b>	<b>74</b>
4.1 calculo de Gasto eléctrico .....	74
4.2 Coste de las instalaciones y presupuesto.....	77
4.3 análisis de la Rentabilidad .....	81
<b>5. Conclusiones.....</b>	<b>84</b>
<b>6. Bibliografía y Software .....</b>	<b>87</b>

## Índice de Figuras

figura 1 Vista general EDAR Barbastro .....	21
figura 2 Zonas EDAR Barbastro.....	23
figura 3 Edificio de control .....	24
figura 4 Desarenadores -desengrasadores.....	25
figura 5 clasificador de arenas.....	25
figura 6 deposito de fangos.....	26
figura 7 tratamiento biológico.....	27
figura 8 decantador .....	28
figura 9 cámara de cloración .....	28
figura 10 relación entre el tiempo de retención y la temperatura .....	42
figura 11 Esquema digester de flujo continuo .....	43
figura 12 esquema básico de un digester de flujo continuo .....	46
figura 13 variables de diseño del deposito.....	52
figura 14 parámetros de diseño de las cámaras .....	54
figura 15 interior de un digester .....	54
figura 16 exterior del depósito de digestión .....	55
figura 17 esquema de la instalación.....	55
figura 18 Tabla PCI Biogás-%metano.....	60
figura 19 Motor de Cogeneración .....	64
figura 20 Motor de cogeneración.....	64

figura 21 Bomba centrífuga.....	71
figura 22 Bomba de Pozo .....	71
figura 23 Cubierta Cámara de digestión.....	71
figura 24 Agitador Horizontal .....	72
figura 25 Filtros de Biogás .....	72
figura 26 Deposito de almacenamiento de Biogás.....	72
Figura 27 Quemador de antorcha .....	73
figura 28 Compresor con Soplante.....	73
figura 29 Bomba recirculadora.....	73

## Índice de Tablas

Tabla 1 Consumo aproximado por metro cubico.....	32
Tabla 2 Consumo energético de los equipos extra .....	33
Tabla 3 composición del Biogás.....	36
Tabla 4 Rangos de temperaturas en la digestión anaerobia.....	50
Tabla 5 cantidad de Biogás Generada dependiendo del tipo de sustrato .....	56
Tabla 6 Características del Biogás .....	58
Tabla 7 Composición Porcentual del Biogás.....	58
Tabla 8 Ficha técnica motor 45kW .....	65
Tabla 9 Ficha Técnica motor 60kW .....	67
Tabla 10 Consumos energéticos instalación Biogás.....	75
Tabla 11 Flujos de Caja de la amortización del Proyecto .....	82

## Índice de Gráficos

Gráfico 1 PCI Biogás-%metano .....	60
Gráfico 2 Variación del Payback y la TR con distintas Tarifas .....	83



## **1. Título y objeto del proyecto**

### **1.1 Introducción**

El proyecto consiste en realizar un estudio para la valorización energética de los fangos producidos en la estación depuradora de aguas residuales (EDAR) de la localidad de Barbastro (Huesca), así como el desarrollo de un estudio con el fin de comprobar la viabilidad, tanto técnica como económica, de la instalación de un digestor anaerobio, para la producción de biogás a partir de fangos primarios y secundarios generados durante el proceso de depuración.

Este estudio constará de tres partes, una primera parte compuesta por el estudio técnico, en la que se analizarán todos aquellos parámetros que afecten al proceso de digestión y se realizarán los cálculos necesarios para el dimensionado de un digestor. Otra segunda parte en la que se evaluará la viabilidad y rentabilidad económica de la instalación, tanto los costes aproximados, como los beneficios obtenidos con y sin la instalación. Por último la tercera parte en la que se extraerán las conclusiones acerca de la posible instalación.

### **1.2 Localización de la instalación**

La instalación estará ubicada en la EDAR de la localidad de Barbastro (Huesca) cuyas coordenadas geográficas son: 42° 2' 0"N, 0° 7' 0" E. Barbastro está situado a 341 m sobre el nivel del mar, en una zona en la que predomina el clima mediterráneo, con una temperatura media anual de 14.7°C, alcanzándose temperaturas medias de 24.4°C en agosto y de 5.5°C en enero. En lo que respecta a la población, Barbastro cuenta con 17.304 habitantes (2012). Tanto el número de habitantes como sobre todo la temperatura del entorno serán influyentes a la hora del diseño del digestor.

### **1.3 Objetivos del proyecto**

El principal objetivo de este proyecto será realizar un estudio para la valorización energética de los fangos generados en la EDAR de Barbastro

durante el proceso de depuración de las aguas residuales de dicha localidad. Con ello analizaremos si estos fangos podrían ser utilizados como afluente de un digestor anaerobio.

Al instalar un digestor anaerobio, que se alimentara de estos lodos, por una parte obtendremos biogás, que podría ser utilizado para generación eléctrica y de calor (cogeneración) y además obtendremos un efluente útil para ser vendido como fertilizante o abono de uso agrícola, así como para plantas de compostaje.

Esta electricidad, generada al quemar el biogás producido por el biodigestor en un motor conectado a un alternador, supondría un ahorro en el gasto total de energía eléctrica de la planta, así como un beneficio extra producido por la venta de los efluentes secundarios del digestor como abono o fertilizante.

Actualmente la EDAR de Barbastro únicamente obtiene beneficio de la venta de sus fangos primarios y secundarios, generados durante la depuración de las aguas residuales y pluviales de la ciudad. Estos fangos son vendidos a empresas agrícolas, como abono o como componentes para la fabricación de compost y fertilizantes. Principalmente debido a su alto contenido en nitrógeno y otras sustancias que favorecen la restitución del suelo, y por lo tanto el crecimiento de las especies vegetales.

La instalación de un digestor en la planta, nos permitirá pues, generar una electricidad extra, que no será necesario coger de la red, lo que producirá un ahorro en el consumo de electricidad de la planta.

## **2. Valorización energética y económica de los Fangos**

El estudio para la valorización energética-económica de los lodos primarios y secundarios obtenidos durante el proceso de depuración, va a consistir en analizar las distintas posibilidades de uso de dichos fangos, con sus ventajas e inconvenientes, tanto técnicos como económicos.

En este punto analizaremos las opciones más frecuentes de tratamiento de los fangos en las estaciones depuradoras: descarga a vertederos o plantas

de compostaje, incineración de fangos y por último el caso que centra el interés de este proyecto, la digestión anaerobia.

## **2.1 Descarga a vertederos**

Una de las soluciones más veces adoptada por las estaciones depuradoras es la de destinar sus fangos a rellenar y compactar terrenos cuyo uso está dedicado a escombreras y vertederos. Antes de trasladar y depositar el fango en los vertederos, este tiene que ser deshidratado. Para que sea manejable se debe reducir su contenido de humedad hasta alcanzar unos niveles del 70% aproximadamente.

En nuestro caso, según los datos de funcionamiento obtenidos de la EDAR durante el año 2011, el porcentaje de sequedad media de los lodos producidos es del 20.2% por lo tanto sería necesario disminuir la humedad un 10% para que su transporte y deposición se pudieran realizar de una manera óptima.

Para reducir esta humedad sería necesario someter a los lodos primarios y secundarios a algún tratamiento de secado, ya sea al aire libre o bien un proceso de secado en hornos o en centrifugadoras mecánicas. Si el proceso elegido para disminuir la humedad es un tratamiento de secado mediante horno, habrá que tener en cuenta el coste extra de energía que supondrá el funcionamiento de dicha instalación.

La principal ventaja que tiene la deposición de los fangos en vertederos es que no es necesario ningún tipo de instalación específica para su procesamiento (a excepción de hornos de secado) por lo tanto la dificultad técnica es nula y los costes económicos son relativamente bajos.

Por otra parte los grandes inconvenientes con los que cuenta esta opción son que no se genera ningún tipo de beneficio, ni a nivel de obtención de energía, ni a nivel económico. En este último aspecto más bien sucede todo lo contrario, ya que debido a la problemática de su transporte y deposición se generan una serie de costes añadidos. Estos fangos necesitan ser transportados y almacenados en lugares específicos, como por ejemplo en vertederos controlados, para evitar la contaminación que podría producirse,

tanto de las aguas subterráneas como de las corrientes superficiales. Como ya se ha mencionado anteriormente este transporte y almacenaje es realizado por empresas especializadas en tratamiento de residuos, por lo que se genera un coste económico añadido a los costes de la planta.

Esta opción aunque no está muy extendida, es generalmente aplicada en plantas cuyo volumen de agua tratado es muy pequeño, y por lo tanto el volumen de fangos producido también lo es. Esto suele ocurrir en núcleos de población reducidos, como en poblaciones inferiores a 5000 habitantes y en estaciones depuradoras de núcleos rurales.

## **2.2 Uso en plantas agrícolas y de compostaje**

Los fangos producidos durante el proceso de depuración de las aguas pueden ser utilizados en el sector agrícola. Esto es principalmente debido a que son interesantes tanto por la materia húmica que contienen, como por la mejora que estos producen en el poder de retención del agua en el suelo, además de por la aportación de materias nutritivas para las especies vegetales.

La incorporación al suelo de fangos orgánicos estabilizados o digeridos, puede facilitar la proliferación de flora microbiana autótrofa, que actúa directamente sobre la nutrición mineral de los vegetales.

La principal ventaja de la utilización de los fangos de depuradora como materia prima para la producción de abonos, o para compostaje, es que su venta a empresas agrícolas como fabricas de abonos y fertilizantes, genera un beneficio económico directo en la instalación. Por otro lado al elegir esta opción nos evitamos tener que gestionar los fangos como residuos, que como se ha visto en el apartado anterior genera costes económicos.

Los principales inconvenientes son aquellos derivados de su proceso de estabilización, como por ejemplo la posible presencia de elementos u organismos patógenos y metales pesados, que podrían afectar al suelo.

Desde el punto de vista técnico no es necesaria ninguna instalación específica en la EDAR ya que estos fangos pueden ser directamente utilizados (una vez estabilizados) como abono liquido. Si el uso es como material para la

fabricación de compost, sería necesario la instalación de un pequeño horno de secado para disminuir el porcentaje de humedad de los lodos.

Esta opción es la más extendida entre las instalaciones de depuración ya que genera un beneficio económico directo sin apenas instalaciones específicas. Generalmente es usada en las EDAR de localidades con poblaciones comprendidas entre los 5000 y 40000 habitantes ya que en estas el volumen de fangos generado es mayor y por lo tanto se puede obtener un beneficio económico mayor por su venta.

Hasta el momento se han analizado las distintas opciones desde el punto de vista económico, de aquí en adelante estudiaremos las opciones centrándonos en el punto de vista energético y de la posible recuperación de la energía de los fangos producidos durante la depuración de las aguas.

La valorización energética de los fangos producidos en la depuradora consiste en obtener y cuantificar la energía que puede ser extraída o recuperada de dichos fangos una vez han abandonado el ciclo de depuración de las aguas. De esta forma los fangos ya no son considerados como un residuo cuyo tratamiento es problemático y costoso, sino como una fuente para la obtención de energía, ya sea calorífica o eléctrica. La valorización energética puede realizarse según dos formas principales. La aplicación de una u otra dependerá entre otros factores de la cantidad de agua tratada en la instalación, del tipo de fango producido, su humedad, su composición química y del tamaño de la población. Se pueden distinguir dos procesos:

- Digestión anaerobia de los lodos: se basa en la producción de gas metano por fermentación.
- Incineración: utilización del poder calorífico generado por la combustión de los lodos.

En ambos procesos se consigue una recuperación de parte de la energía contenida en los fangos, que podrá ser transformada en energía eléctrica o calórica en función de las necesidades de la planta. En el caso de este proyecto se llevara a cabo una digestión de los lodos primarios y

secundarios en un biodigestor anaerobio, en el que se producirá biogás que posteriormente será quemado en un motor, conectado a un generador para la producción de energía eléctrica.

A continuación analizaremos las dos opciones centrándonos en los aspectos más destacados de cada uno de ellas, en sus ventajas e inconvenientes, y en porque nos hemos decantado por la opción de la biodigestión.

### **2.3 Incineración de lodos**

La incineración es una opción que consiste en quemar los lodos generados en la depuradora para eliminarlos y al mismo tiempo producir calor, que puede ser utilizado para calentar agua y generar electricidad en una turbina de vapor.

De esta manera obtenemos electricidad a partir de la combustión de lodos, así recuperamos parte de la energía que estos contienen, y que de otra manera se perdería. Este proceso produce un ahorro en la electricidad consumida por la planta, ya que parte de esta es generada mediante un ciclo con turbina de vapor, y por lo tanto supone un ahorro tanto energético como económico.

La incineración es un proceso que conduce a la eliminación total del agua intersticial y a la combustión de las materias orgánicas de los fangos. Es el proceso por el cual se consigue un producto residual de menor masa, las cenizas. Los patógenos contenidos en los lodos son completamente destruidos. La incineración se aplica en el caso de fangos sometidos previamente a una deshidratación, ya sea mecánica (filtración o centrifugación) o calórica, por lo tanto tendremos que tener en cuenta las instalaciones necesarias para realizar esta deshidratación desde el punto de vista del consumo de energía y económico.

A continuación se expondrán las principales ventajas e inconvenientes, que han servido para justificar la no elección de esta opción para la EDAR de la localidad de Barbastro.

Las principales ventajas son:

- Reducción del fango húmedo en casi un 95% , llevando a cabo la combustión del fango previamente deshidratado, evitamos casi por completo los residuos generados durante el proceso de depuración de las aguas, con la problemática que su transporte y deposición conlleva.
- Destrucción y reducción a límites aceptables de los compuestos orgánicos peligrosos contenidos en los fangos y que podrían generar problemas medioambientales.
- Eliminación de los patógenos con garantía total. Los microorganismos contenidos en los fangos son eliminados de manera completa durante el proceso de combustión.
- Posibilidad de recuperación de energía para otros usos, especialmente en forma de energía eléctrica, que como se ha comentado anteriormente supondrá un ahorro en los consumos de electricidad y por consiguiente también económico.

En lo que hace referencia a los inconvenientes los principales son:

- Elevado coste de instalación y mantenimiento. Para llevar a cabo esta opción son necesarios equipos muy costosos, como hornos e incineración que trabajan a altas temperaturas, turbina de vapor para la generación eléctrica, además de un continuo mantenimiento tanto en la limpieza de las cenizas generadas como en el control de los gases emitidos.
- Necesidad de personal cualificado. La complejidad de las instalaciones anteriores implica que exista un personal altamente cualificado trabajando en su control y mantenimiento, lo que produce un aumento de los costes y gastos en personal.
- Evacuación al medio ambiente de gases, partículas, aguas de lavado y cenizas, que pueden exigir un tratamiento adicional.

Según datos del Plan nacional de Lodos de depuradoras 2007-2015 solo un 4% de los lodos generados va destinado a ser incinerados. Aunque existen diversos factores que hacen que cada vez sea una opción más atractiva como destino final de lodos, como las dificultades para disponer de vertederos y las restricciones para la aplicación de fangos en la agricultura.

El principal condicionante para estas instalaciones es que requieren un elevado coste y por lo tanto solo son adecuadas para estaciones depuradoras cuyo volumen de agua tratada y el volumen de lodos sea muy elevado.

En el caso que nos ocupa se ha descartado esta opción, debido a que el volumen de fangos tratados en la depuradora de Barbastro es de 2029 t al año, una cantidad bastante pequeña en comparación con otras instalaciones depuradoras que aplican esta opción (EDAR la cartuja, Zaragoza). Por ello al ser una cantidad tan pequeña hace que los costes de instalación y funcionamiento sean muy elevados en comparación con los beneficios que se obtienen.

## **2.4 Digestión Anaerobia de fangos**

La digestión anaerobia de fangos es un proceso que consiste en la producción de biogás a partir de la fermentación de la materia orgánica contenida en estos. A diferencia de la incineración, la digestión anaerobia es un proceso que no requiere grandes cantidades o volúmenes de lodos para que su funcionamiento pueda ser viable. Mediante este proceso podemos recuperar parte de la energía contenida en los fangos, al producirse biogás por fermentación que posteriormente transformaremos en energía eléctrica en un generador conectado a un motor de combustión especial para biogás.

Hasta hace unos años la digestión anaerobia era una opción muy poco utilizada como destino final de los lodos de depuradora, pero desde un tiempo a esta parte esta opción ha ido ganando fuerza y el porcentaje de instalaciones que desarrollan este proceso se ha ido incrementando, debido principalmente al auge de las energías renovables, al ahorro energético y económico que suponen estas instalaciones a la larga y a la dificultad creciente para



deshacerse de los lodos generados en las depuradoras, que suponen un problema para las empresas que las gestionan y en ocasiones para el medio ambiente.

La digestión anaerobia no solo es aplicada en lodos de depuradoras, sino en mayor medida en instalaciones ganaderas y agrícolas, el proceso es el mismo que el caso de una depuradora, solo que en este caso el afluente utilizado para la fermentación y la producción del biogás son los purines animales y los restos agrícolas. La implantación de estas plantas supone un aumento de la rentabilidad de las instalaciones, ya que aparte de conseguir un ahorro del gasto de energía se evita también el problema de manipulación y deposición de purines y desechos, que pueden afectar al medio y a la contaminación de las aguas.

Al realizar la digestión anaerobia se obtiene, a parte del biogás para producción eléctrica, un efluente en forma de lodo o fango muy rico en material inorgánico que puede ser vendido como materia prima para la fabricación de abonos agrícolas. Con esto se obtiene una doble rentabilidad económica: la producida por el ahorro del consumo de energía y la producida por los beneficios de la venta del efluente.

Desde el punto de vista de la valorización energética esta es la opción elegida para el desarrollo del proyecto por diversas razones que se expondrán a continuación:

- Como se ha comentado anteriormente la gran ventaja de la digestión anaerobia sobre la incineración es que no es necesario un gran volumen de lodos para que pueda ser viable la instalación. Así pues esta opción, junto con la de venta a plantas agrícolas son las más adecuadas para localidades como Barbastro (Huesca) que posee una población de 17.304 habitantes, es decir, para localidades de tamaño medio. Estas localidades generan suficientes fangos como para estudiar la posibilidad de recuperar cierta parte de su energía mediante digestión, y así no realizar una venta directa a empresas agrícolas como se hace en la actualidad.
- A diferencia de la incineración no es necesario realizar ningún tipo de tratamiento anterior al los fangos. Estos fangos una vez abandonan

la línea de fangos en el proceso de depuración de aguas, son directamente conducidos al tanque de admisión del digestor, donde se disuelven con la cantidad óptima de agua para llevar a cabo la fermentación. Evitamos así un mayor consumo de energía eléctrica.

- Por último además de recuperar energía de unos fangos, que de otra manera sería tratados como residuo, se puede obtener un beneficio directo por la venta del efluente del digestor, rico en materia inorgánica para uso agrícola.

Así pues se ha considerado que la propuesta más óptima para realizar un estudio acerca de la posible recuperación de energía a partir de los lodos generados durante el proceso de depuración de las aguas residuales de la localidad de Barbastro, es la instalación de un digestor anaerobio para la producción de biogás y la posterior generación eléctrica. La elección ha sido realizada atendiendo a las características de funcionamiento de esta planta depuradora, ya que la cantidad de fango producida al año no es lo suficientemente grande para la instalación de una incineradora con ciclo de turbina de gas.

### 3. Estudio Técnico para la instalación de un Digestor anaerobio.

#### 3.1 Alcance del estudio Técnico

Este apartado del proyecto tiene el objetivo de explicar los aspectos técnicos de los procesos que se llevan a cabo en la planta depuradora. Por un lado se encuentra el proceso principal de depuración de aguas residuales, mientras que por otro tenemos el proceso de tratamiento de los fangos generados y los usos que a estos se les aplica una vez finaliza el proceso de depuración de las aguas.

En el caso de este proyecto y según se ha explicado en el apartado anterior se ha escogido la digestión anaerobia de fangos para llevar a cabo la valorización energética, y así recuperar parte de la energía que estos contienen y que de otra manera se desperdiciaría.

Se trataran y explicaran temas como:

- **Situación actual de funcionamiento de la planta depuradora.**
- **Proceso de depuración:** resumen del proceso de depuración, etapas e instalaciones donde se lleva a cabo.
- **Proceso de digestión:** se realizará una explicación del proceso de digestión, los tipos que existen y los factores que influyen en el.
- **Digestor anaerobio:** explicación de su funcionamiento y de sus partes.
- **Dimensionado del digestor:** desarrollo y explicación de los cálculos realizados para dimensionar el digestor
- **Producción de Biogás:** volumen de biogás obtenido a partir del digestor
- **Producción de electricidad y generación de calor:** resumen y explicación de los procesos llevados a cabo para generar energía eléctrica, también del calor que será utilizado para calentar el digestor.

- **Fangos y lodos del digestor:** destino final de los lodos generados en el digestor anaerobio.

### **3.2 Situación actual de funcionamiento de la Planta depuradora**

Este apartado recoge todos los aspectos que tienen que ver con la situación actual de funcionamiento de la depuradora de Barbastro, como el tipo de proceso que utiliza, sus datos técnicos, datos de funcionamiento, personal que trabaja en la instalación...etc. El objetivo de este proyecto es hacer un estudio para la posible instalación de un sistema de digestión a continuación de los procesos que funcionan actualmente y comprobar su viabilidad. Todos estos datos serán importantes a la hora de plantear el diseño y dimensionado de dicho digestor.

Las instalaciones de la estación depuradora de la localidad de Barbastro están situadas a una distancia de aproximadamente 3 km de dicha ciudad, junto a la carretera nacional N-240 en dirección Lérida. La planta depuradora devuelve las aguas completamente tratadas al Río Vero.

Los núcleos a los que sirve esta estación depuradora es la localidad de Barbastro (Huesca), que cuenta con una población de 17.304 habitantes. La instalación entró en servicio el 15 de julio del año 2000, siendo el titular de la explotación es el Instituto Aragonés de Agua.

En lo que respecta a los datos económicos, el coste de construcción fue de 3.985.833 €, dicha construcción fue financiada en un 75% por el fondo de cohesión y en un 25% por el Instituto Aragonés del Agua.

A continuación se realizara una explicación de todos los procesos llevados a cabo en la EDAR, datos de funcionamiento e instalaciones.

#### **3.2.1 Datos técnicos y de funcionamiento de la EDAR**

Actualmente el sistema de depuración llevado a cabo en la instalación consiste en una depuración de las aguas por medio de un proceso de fangos activados por aireación prolongada.

### DATOS TECNICOS

**Tipo de tratamiento:**

Fangos activados por aireación prolongada

**Capacidad de tratamiento:**

8.640 m<sup>3</sup>/día

**Capacidad de carga:**

25.000 habitantes equivalentes.

### DATOS DE FUNCIONAMIENTO

**DBO<sub>5</sub> (entrada):** 306

**DBO<sub>5</sub> (salida):** 6

**DQO (entrada):** 539

**DQO (salida):** 30

**Caudal medio diario:** 4452 (m<sup>3</sup>/día)

**Sólidos en suspensión (entrada):** 207

**Sólidos en suspensión (salida):** 5

**Toneladas de fango tratadas (año):**2029

**Sequedad media de fangos:** 20.2%



Figura 1 Vista general EDAR Barbastro

Observando los datos técnicos y de funcionamiento de la estación depuradora, se puede ver que la capacidad de carga corresponde a 25.000 habitantes, del mismo modo el caudal medio tratado por día es de 4452 m<sup>3</sup>, mientras que la capacidad máxima de la EDAR es de 8.640 m<sup>3</sup>, este margen es

debido a que la depuradora no solo realiza el tratamiento de las aguas fecales de los hogares y edificios de la localidad, sino que además también lo hace de las aguas pluviales, y por ello es necesario que el caudal máximo que puede tratar la depuradora sea mayor, y así poder hacer frente a posibles eventualidades como crecidas provocadas por lluvias.

Por otra parte en la vista general de la estación depuradora (figura 1), se puede observar, que existen unas zonas actualmente sin construir. Estas zonas son áreas habilitadas para llevar a cabo una posible ampliación de la instalación, en el caso de un crecimiento en la demanda de tratamiento o de la posible instalación de equipos supletorios a los actuales.

En el caso que afecta a este proyecto, estas zonas despejadas serán utilizadas para la construcción del digestor, los depósitos de carga y descarga de los fangos, tanque de almacenamiento del biogás y por último del edificio donde se encontraran las instalaciones de cogeneración.

### **3.2.2 Instalaciones y funcionamiento de la depuradora**

En este apartado se va a realizar una descripción de cada una de las instalaciones y equipos que forman parte de la estación depuradora, así como de los distintos procesos que se llevan a cabo en cada uno de estos equipos.

Al observar la vista general de la EDAR se pueden distinguir tres zonas diferenciadas, en las que se llevan a cabo las distintas fases del proceso de tratamiento y depuración de aguas residuales.



Figura 2 Zonas EDAR Barbastro

- **Zona 1:** es la zona en la que se desarrollan los procesos de pre-tratamiento de las aguas y se almacenan los lodos resultantes, en ella se encuentra el edificio de pretratamiento y el depósito de lodos.
- **Zona 2:** es la zona en la que se llevan a cabo los procesos de tratamiento físico-químico y biológico de las aguas. Es una zona en la que las instalaciones se encuentran al aire libre, debido a que es necesaria la presencia de oxígeno para que se desarrollen estos procesos de una manera adecuada. En esta zona se encuentran los decantadores, el tanque de tratamiento biológico y el tanque de cloración.
- **Zona 3:** Se encuentra la zona de acceso a la planta, la zona de parking y el edificio de control.

## Instalaciones

A continuación se procederá a realizar una descripción de cada uno de los equipos, explicando la función que cada uno de ellos desempeña en el proceso de depuración de las aguas residuales.

- Estación de bombeo: cuenta con un depósito colector que recoge las aguas del municipio, tanto las aguas procedentes de los hogares

como las pluviales. En este depósito existen cuatro bombas sumergidas que aportan un caudal de  $300 \text{ m}^3/\text{h}$ , para trasladar las aguas hasta la planta depuradora.

- Depósito o Cámara de Recepción: se trata de un depósito enterrado al cual llegan las aguas que han sido bombeadas desde la estación de bombeo situada en la localidad. En este existe un primer filtro para separar los objetos más grandes.
- Edificio de control: este edificio está situado en la entrada de la planta depuradora. Cuenta con una sala de control, donde están situados los paneles de control de los distintos equipos que operan en la estación depuradora. Aquí se vigila el correcto funcionamiento de los distintos procesos, también se registran todos los caudales de entrada y salida en la EDAR. Además el edificio de control cuenta con un laboratorio, donde se analizan los distintos componentes de los lodos y el agua en cada una de las fases del proceso para comprobar si la concentración existente de los distintos componentes es la adecuada.



Figura 3 Edificio de control

- Edificio de pretratamiento: está situado en la entrada de la planta, en se encuentran equipos e instalaciones pertenecientes a la línea de depuración de aguas y otros a la línea de procesamiento de fangos. los principales equipos de la línea de agua son:



- Canal de Bypass: dotado de una reja de limpieza manual, para separar objetos grandes y basura.
- Separador de grasas: está situado en el interior del edificio y realiza la primera limpieza de las grasas contenidas en el flujo.
- Desarenadores - desengrasadores: son dos, se encuentran situados anexos al edificio en la parte exterior. Ambos cuentan con un puente móvil. Su labor es la de separar las grasas y las arenas contenidas en el flujo. Las grasas flotan debido a su menor densidad, mientras que las arenas se depositan en el fondo del tanque por su mayor peso.



Figura 4 Desarenadores -desengrasadores

En lo que respecta a la línea de fangos en este edificio se encuentran los siguientes equipos:

- Separador y clasificador de arenas: situado en la parte exterior junto al desarenador. Está compuesto por un canal y un tornillo sin fin, su función es recoger las arenas que quedan en el fondo del desarenador y verterlas directamente a un contenedor donde se secan al aire libre.



Figura 5 Clasificador de arenas

- Centrifuga: se encuentra en el interior del edificio, se trata de un aparato cuya función es eliminar la humedad existente en los fangos tras el proceso de depuración hasta unos valores que sean aceptables para su correcto almacenamiento.
- Deposito de lodos: se encuentra situado junto al edificio, se trata de un tanque cilíndrico de hormigón armado, cuya función es almacenar los fangos que se producen durante el proceso de depuración hasta que estos fangos sean transportados hasta su destino final.



Figura 6 Depósito de fangos

El edificio de pretratamiento, deshidratación y espesador de fangos cuentan con un sistema de ventilación forzada y desodorización por medio de carbón activo.

- Tanques de tratamiento biológico: se trata de dos tanques de 4,5 metros de profundidad y un volumen unitario de 2725 m<sup>3</sup>. Estos tanques se encuentran situados al aire libre, debido a que para que se lleve a cabo el tratamiento biológico es necesario la presencia de oxígeno. En cada uno de ellos existen una serie de soplantes, que insuflan aire desde el interior para obtener una adecuada proporción de oxígeno y además existe un agitador de tipo hélice en ambos para garantizar un correcto flujo de los lodos.

El tratamiento biológico se basa principalmente en añadir una serie de microorganismos a los lodos, que necesitan oxígeno para sobrevivir, estos se alimentan de la materia contenida en los lodos y forman flóculos que por su mayor peso se depositan en el fondo, mientras que el agua tratada sale por las canales situadas a nivel superficial.



Figura 7 Tratamiento biológico

- Cámara de recirculación: se trata de un pequeño tanque situado junto a los de tanques de tratamiento biológico. Su principal función es recibir los fangos que provienen del tratamiento biológico y de los decantadores, y mandar una parte a la siguiente fase de depuración y la otra de nuevo al tratamiento biológico para que vuelva a ser tratada.
- Decantadores: son dos tanques cilíndricos de 4,5 metros de profundidad, situados a continuación de los tanques de tratamiento biológico. Cuentan con un puente móvil que realiza un movimiento circular para mover los lodos que se van depositando en el fondo. Su función es separar las partículas sólidas mediante sedimentación. Estas debido a su mayor peso se van al fondo del tanque donde son recogidas, formando los lodos, que como se ha explicado anteriormente una parte de ellos es recirculada a la cabecera de la línea de tratamiento, mientras que la otra es mandada al depósito de lodos, donde se mantendrán hasta ser transportados a su destino final.



Figura 8 Decantador

- Cámara de cloración: se trata de un tanque semienterrado situado a continuación de los decantadores, su función es la de desinfectar las aguas tratadas añadiendo cierta cantidad de cloro para que estas puedan ser evacuadas finalmente al río Vero totalmente depuradas.



Figura 9 Cámara de cloración

## **Funcionamiento**

La primera etapa del proceso de depuración consiste en la recogida de todas las aguas del municipio. El sistema de saneamiento y depuración de aguas residuales de Barbastro, consta de una estación de bombeo situada en la localidad, que recoge las aguas del municipio y las impulsa a la estación depuradora. Esta estación de bombeo está alojada en un edificio en el que se encuentran cuatro bombas sumergibles que aportan un caudal de  $330 \text{ m}^3/\text{h}$ , además existe un primer filtro para partículas gruesas formado por unas rejillas manuales que evitan el mal funcionamiento de las bombas.

Las aguas entran en la cámara de recepción a su llegada a la EDAR. Estas pasan al edificio de pretratamiento, donde comienza el proceso de depuración propiamente dicho. En primer lugar las aguas sufren un proceso de desbaste, existe un tamiz automático de sólidos finos y un tornillo que transporta los sólidos a un contenedor. Existe también un canal Bypass dotado de una reja de limpieza manual para acabar de desbastar las aguas.

A continuación se emplazan dos Desarenadores – desengrasadores aireados (exterior del edificio) dotados de un puente móvil. En estos equipos se separan las arenas y las grasas contenidas en el flujo. Las grasas poseen una menor densidad que el agua y por lo tanto suben a la superficie, donde son retiradas por un tamiz móvil. Por otra parte las arenas debido a su mayor peso se sedimentan en el fondo, donde son recogidas y mandadas a un clasificador que finalmente las deposita en un contenedor.

Las aguas así pretratadas entran al tratamiento biológico, que tiene lugar en dos líneas paralelas de volumen unitario  $2725 \text{ m}^3$  y de tipo carrusel. Cada línea consta de un agitador tipo sumergido para vehicular el flujo y el aporte de oxígeno se realiza por medio de 3 soplantes accionados por bombas de una potencia unitaria de 75kW, estas se encuentran alojadas en un edificio anexo al de pretratamiento.

En esta fase del proceso de depuración se lleva a cabo lo que se denomina fangos activados. El proceso de tratamiento biológico mediante fangos activados consiste en introducir una serie de microorganismos en los tanques en los que se encuentran los lodos pretratados. Estos microorganismos se alimentan de la materia orgánica existente en los lodos, así como de nitrógeno y fosforo. Para que se mantenga la concentración de

Microorganismos y se pueda llevar a cabo el proceso es necesaria la presencia de oxígeno, por ello se introduce aire en los tanques mediante los soplantes además de ser agitados constantemente por medio de un agitador.

A medida que los microorganismos se desarrollan y crecen, estos se van agrupando formando elementos de mayor tamaño llamados flóculos. Los flóculos se sedimentan en el tanque debido a su mayor peso. En este proceso el nivel de oxígeno disuelto en el flujo se controla por medio de analizadores en continuo, regulándose el aporte del mismo mediante variadores de frecuencia conectados a los soplantes.

El fango generado en este proceso parte es recirculado desde la cámara de recirculación a la cabecera de la línea para volver a realizar el tratamiento, mientras que el resto es llevado a la línea de tratamiento de fangos, donde se elimina el exceso de humedad con una centrifuga y posteriormente se almacena en el depósito de fangos.

Por otra parte el flujo de agua que sale del tratamiento biológico es clarificado en los decantadores, en los cuales el resto de partículas presentes en dicho flujo se depositan en el fondo por sedimentación, formando los fangos secundarios que son trasladados a la línea de tratamiento de fangos y almacenados en el depósito.

Por último el agua es vertida finalmente al río Vero, tras pasar por una cámara de cloración y captación de agua de servicios.

En lo que hace referencia a los tratamientos que se llevan a cabo con los fangos y como se ha dicho antes estos son espesados por medio de una centrifuga, que elimina parte del agua. Posteriormente estos son impulsados por un tornillo helicoidal a la tolva del depósito, donde esperan para ser retirados de la depuradora y trasladados a su destino final, que en el caso de la EDAR de la localidad de Barbastro es de uso agrícola.

### 3.2.3 Análisis de costes y Consumos Energéticos

El análisis de los consumos energéticos de la planta depuradora constituye una parte muy importante del estudio técnico y del proyecto, ya que el conocimiento, aunque sea de una manera aproximada de la cantidad de energía eléctrica consumida por los distintos procesos permitirá comprobar la viabilidad de otras opciones, como en este caso la instalación de un digestor anaerobio. Así pues comparando los consumos energéticos con y sin dichas instalaciones se podrá comprobar su viabilidad tanto a nivel energético como a nivel económico.

En lo que hace referencia a los costes asociados a la explotación y mantenimiento de una estación depuradora, se puede establecer una clasificación de los diversos tipos de costes que componen el gasto total de este tipo de instalaciones y en general de cualquier otra explotación industrial. En primer lugar se tendrán los costes asociados al personal que trabaja en la planta depuradora. Actualmente trabajan un total de cinco empleados en la instalación, con diferentes categorías y asignaciones salariales:

- 1 jefe de planta
- 1 oficial
- 3 empleados

Por otra parte estarán los costes asociados a los materiales y herramientas empleadas en las distintas etapas que se llevan a cabo en el proceso de depuración de las aguas residuales. En este apartado se incluirán los costes de las sustancias añadidas al agua, como por ejemplo el cloro o los microorganismos y otras sustancias utilizadas en el tratamiento biológico, además de todas aquellas herramientas, maquinas y utensilios utilizados en el día a día de la planta.

Por último estarían los costes relacionados con el mantenimiento de las instalaciones de la planta depuradora. En este apartado se incluirían todos aquellos gastos relacionados con el mantenimiento y conservación de los de los equipos, como reparaciones preventivas o averías. También se incluyen los

gastos asociados a la limpieza y mantenimiento de la infraestructura de la planta, como la limpieza de los edificios y las labores de jardinería de las zonas exteriores.

Si se desglosan los costes de explotación de una depuradora se puede observar que los costes de energía eléctrica pueden suponer hasta una cuarta parte del coste total de explotación. Por ello estos costes suponen un aspecto importante a nivel económico y la reducción del consumo eléctrico puede llevar a grandes ahorros en el aspecto económico.

#### Distribución de costes asociados la explotación de una EDAR

Costes de Personal	35-65 %
Coste de energía eléctrica	10-25 %
Costes de materiales	20-25%
Costes de mantenimiento	5-15 %

De esta manera se ha llevado a cabo una estimación aproximada de cuál es el consumo energético actual de la depuradora. Para ello se han tenido en cuenta los datos de distintas bibliografías sobre consumos eléctricos en depuradoras, ya que es imposible obtener los datos exactos de consumo.

A continuación se dan los consumos energéticos en una depuradora para cada uno de los procesos en Wh por m<sup>3</sup> de agua tratada (U.S Department of energy, 1979)

<b>Proceso</b>	<b>Consumo (Wh/m<sup>3</sup>)</b>
Decantación primaria	2.0
Fangos activados por aireación prolongada	480.31
Tratamiento físico-químico	29.02
cloración	56.97
centrifuga	15.16
Transporte a planta	14.25
<b>TOTAL</b>	<b>597.71</b>

Tabla 1 Consumo aproximado por metro cubico



Aplicando los datos de la tabla y sumando cada uno de los procesos, se obtiene que el consumo es de 597.71 Wh/m<sup>3</sup>, o lo que es lo mismo se obtiene un consumo energético de 0.59771 kWh/m<sup>3</sup>. De esta manera para calcular el consumo diario de los procesos multiplicamos por el valor del caudal diario que es de 4452 m<sup>3</sup>/día.

$$C_1 = 0.59771 * 4452 = 2661 \text{ kWh}$$

A este consumo energético hay que sumarle un consumo extra producido por equipos particulares, cuya potencia es conocida de manera aproximada y que no se incluyen en la tabla anterior. Estos consumos están formados por:

- 2 agitadores de 1,5 kw que funcionan 8h aprox.
- 4 bombas que transportan las aguas hasta la Edar
- 3 soplantes de aire para el tratamiento biológico
- Consumo eléctrico de la caseta en el que se incluyen:  
6 ordenadores (equivalente a los cuadros de control), 1 nevera, 6 alógenos, 1 calentador, 1 router, 1 bomba de calor, 1 teléfono, una impresora, 6 lámparas exteriores.

<b>Aparatos extra</b>	<b>Consumo (kWh)</b>
2 Agitadores	36
4 bombas	296.8
3 soplantes	225
Consumo caseta	59.72
<b>TOTAL</b>	<b>619.52</b>

Tabla 2 Consumo energético de los equipos extra

Así pues se obtiene el consumo total (Ct) estimado de la instalación depuradora sumando ambos términos:

$$C_t = 3278.52 \text{ kW}$$

### **3.2.4 Destino final de lodos**

Como ya se explicó en el apartado de valorización energética y económica, los fangos que se obtienen del proceso de depuración pueden suponer un serio problema a la hora de encontrarles un destino final. Estos fangos suponen en ocasiones problemas de contaminación ambiental, tanto de aguas como de suelos, por ello deben ser tratados y adecuadamente procesados. Todos estos tratamientos como la estabilización y el transporte a vertederos u otras plantas generan costes adicionales a las estaciones depuradoras.

Como se vio existen diversas opciones para los lodos, vertido a vertederos especializados, venta a explotaciones agrícolas como enmienda orgánica del suelo, incineración y procesos de digestión de fangos. Con las dos últimas se obtendrá un beneficio al realizar una valorización energética de los lodos para poder producir electricidad, pero por el contrario será necesario realizar una inversión para construir las instalaciones. La opción de venta a instalaciones agrícolas supondrá un beneficio económico directo, pero no energético. Por último la opción de ser depositado en vertederos solo genera costes, ya que será necesario contratar empresas especializadas en el tratamiento de este tipo de residuos.

En el caso de la depuradora de Barbastro, actualmente el destino final de los fangos producidos es para uso agrícola. Estos lodos que se producen son secados en una centrifuga hasta alcanzar un nivel adecuado de humedad. Posteriormente son almacenados hasta que son transportados hasta su destino final, en este caso a explotaciones agrícolas y empresas productoras de abonos y fertilizantes. De la venta de los lodos a empresas agrícolas se obtiene un beneficio ya que estas lo emplean directamente como abono para los campos de cultivo o como materia prima para la fabricación de estos.

### 3.3 Digestión anaerobia

Como alternativa a los procesos que actualmente se llevan a cabo con los fangos, se ha elegido el proceso de digestión anaerobia como la forma más adecuada para llevar a cabo la valorización energética de dichos fangos y así poder obtener energía de estos que actualmente no es aprovechada. Además este aprovechamiento de energía traerá consigo un ahorro en el consumo eléctrico y por lo tanto un ahorro económico.

En este apartado se va a hacer una breve descripción de los mecanismos de digestión, de los tipos de procesos que existen y en qué se diferencian. Se llevará a cabo un análisis de cuáles son los factores y variables que afectan al proceso de digestión y por último un repaso de los diversos tipos de digestores que existen actualmente.

#### 3.3.1 Definición y tipos de digestión

Existen dos formas de realizar la degradación de la materia orgánica, en este caso la materia orgánica presente en los fangos producidos durante el proceso de depuración de aguas residuales.

- Digestión o degradación aerobia: el proceso aerobio es llevado a cabo por microorganismos que precisan de oxígeno atmosférico disuelto en agua. La materia orgánica es fermentada a partir de un aporte energético, dando lugar a una reacción exotérmica. La reacción que define un proceso aerobio es de la siguiente forma:



Un ejemplo de lo que sería un proceso de degradación aerobio sería el compostaje.

- Digestión o degradación anaerobia: es un proceso biológico degradativo en el cual parte de la materia orgánica contenida en un

sustrato es convertida en una mezcla de gases, principalmente metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), mediante la acción de un conjunto de microorganismos en ausencia de oxígeno. Frente a los procesos aerobios, los procesos anaerobios presentan la ventaja de no necesitar aireación y de generar biogás que puede ser recuperado y utilizado en la misma planta con finalidades energéticas. Otro aspecto ventajoso es que la generación de lodos es menor, por lo que se reducen los costes en el tratamiento y vertido de fangos.

Por otra parte la degradación anaerobia es un proceso complejo, que requiere cierto control para asegurar su correcto funcionamiento, además de generar unos costes de instalación elevados por lo general.

### Productos finales

Los productos finales del proceso de digestión anaerobia, en sistemas de alta carga y en mezcla completa son el biogás y el efluente estabilizado.

- **Biogás:** es una mezcla gaseosa formada principalmente por metano y dióxido de carbono, con pequeñas proporciones de otros gases como  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$  etc. La composición y riqueza del biogás depende del material digerido así como del funcionamiento del proceso.

Componente	Porcentaje (%)
Metano ( $\text{CH}_4$ )	50-80 %
Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )	30-50 %
$\text{H}_2$ - $\text{H}_2\text{S}$	0-1 %
Nitrógeno ( $\text{N}_2$ )	0-1 %
Oxígeno ( $\text{O}_2$ )	0-1 %

Tabla 3 composición del Biogás

- **Efluente:** es el otro producto resultante de la degradación anaerobia y se puede decir que es el resultado de la mezcla del influente estabilizado y la biomasa microbiana producida. El tipo de reactor, el tipo de residuo y los parámetros de operación empleados determinan la calidad del lodo digerido en cuanto a nivel de contaminación y de organismos patógenos. Como ya se ha comentado, durante el proceso anaerobio parte de la materia orgánica se transforma en metano, por lo que el volumen del efluente generado será menor que el del influente.

### 3.3.2 Fases del proceso

Se pueden distinguir cuatro etapas dentro del proceso de digestión anaerobia:

- 1- Etapa de hidrólisis
- 2- Etapa de acidogénesis
- 3- Etapa acetogénica
- 4- Etapa de metanogénesis

Las tres etapas del proceso ocurren simultáneamente dentro del sistema cada una de ellas es llevada a cabo por un tipo de bacteria diferente y son necesarias para que se produzca biogás y se mantenga la población de microorganismos constante a lo largo del proceso.

#### 1- Hidrólisis

Es el paso inicial para la degradación anaerobia. Es la transformación de la materia orgánica polimérica a compuestos solubles o monómeros, ya que los polímeros no pueden ser utilizados por los microorganismos y estos tienen que ser transformados a monómeros. Todos los sustratos se componen de tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos.

Las proteínas junto con los hidratos de carbono constituyen la fuente de carbono necesaria para alimentar a los microorganismos, mientras que los lípidos generan los ácidos grasos que se emplean en las sucesivas etapas.

## **2- Etapa fermentativa/acidogénica**

Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias. En esta etapa se produce la degradación de la glucosa para formar ácidos orgánicos. También se produce la fermentación de aminoácidos y otras moléculas hidrogenadas, que generan ácidos grasos volátiles.

## **3- Etapa acetogénica**

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos, otros como los ácidos grasos volátiles, generados en el proceso anterior, no. Por ello tienen que ser transformados en otros más pequeños por las bacterias acetogénicas.

## **4- Etapa metanogénica**

Los microorganismos metano génicos completan el proceso de digestión anaerobia mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarburos. Existen dos grandes grupos de microorganismos metanogénicos:

- Hidrogenotróficos: estos microorganismos consumen  $H_2$  y  $CO_2$
- Acetoclasticos: consumen acetato, metanol y algunas aminos

### 3.3.3 Factores influyentes en el proceso de digestión

Existen una serie de factores o variables que condicionan el proceso de degradación anaerobia. El cambio en alguno de estos factores producirá cambios en la cantidad de biogás generado así como en su composición. Si se producen cambios en la cantidad de gas generado también variara el volumen del digestor y el ahorro en electricidad. Los principales factores que afectan al proceso son:

#### 1. Temperatura:

La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos, que a su vez depende de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión dando lugar a mayores producciones de biogás. La temperatura está considerada uno de los principales parámetros de diseño.

Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaerobios: psicrófilico (por debajo de 25 °C), mesófilico (entre 25 y 45 °C) y termófilico (entre 45° y 65°C). El régimen mesófilico es el más utilizado junto con el termófilico, estos regímenes de trabajo proporcionan una mayor cantidad de biogás generado, aunque sin embargo precisan de un aporte de calor extra para mantener la temperatura. Por ello en ocasiones el régimen termófilico puede no resultar rentable, ya que puede suceder que la energía utilizada para aumentar la temperatura sea muy grande y por lo tanto el rendimiento del proceso sea muy bajo.

#### 2. pH y alcalinidad:

Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso presentan unos niveles de actividad óptimos entre los siguientes rangos:

- Fermentativos: 7.2 y 7.4
- Acetogénicos: 7.0 y 7.2

- Metanogénicos: 6.5 y 7.5

Para que el proceso se desarrolle de una manera adecuada es necesario que el pH no baje de 6 y no sea superior a 8. El pH determina también la composición del biogás producido, con valores inferiores a 6 el biogás que se genera en el proceso es muy pobre en metano ( $\text{CH}_4$ ), por lo tanto su poder calorífico es también inferior y se genera menos energía.

### 3. Nutrientes y tipo de materia orgánica

Una de las ventajas de los procesos de digestión anaerobia, frente a los procesos aerobios, es su baja necesidad de nutrientes, derivada de los bajos índices de producción de biomasa que presentan los microorganismos anaerobios. Los principales nutrientes necesarios para el crecimiento de los microorganismos son el nitrógeno, el carbono y el fósforo.

Dependiendo del tipo de materia orgánica seleccionada se tendrán unas determinadas concentraciones de nutrientes para los microorganismos. Por ejemplo, no será lo mismo utilizar excretas animales que restos de cosechas y materia vegetal, ya que la cantidad de carbono que contienen unas y otras harán que la cantidad de biogás generado sea diferente. Además la velocidad de degradación y la composición del biogás dependerán de los nutrientes que posea esta materia orgánica. Los parámetros que se estudian para cuantificar la cantidad de nutrientes existente son:

- **DQO:** Cantidad de oxígeno necesario para oxidar por vía química la materia orgánica presente en el agua residual se expresa en ( $\text{mgO}_2 / \text{l}$ ).
- **DBO<sub>5</sub>:** se cuantifica en ( $\text{mgO}_2 / \text{l}$ ), representa la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar por vía biológica los componentes de un agua residual durante 5 días en condiciones normalizadas.



- **Coefficiente de biodegradación:** una vez conocido el valor del DQO y  $DBO_5$  se puede obtener el valor del coeficiente de biodegradación.

$$Cb = \frac{DBO_5}{DQO}$$

Si el valor se encuentra entre 0.2 y 0.4 se trata de aguas biodegradables.

#### 4. Contenido en sólidos:

La movilidad de las bacterias en el sustrato se ve crecientemente limitada a medida que aumenta en contenido en sólidos en el flujo.

#### 5. Agitación:

La agitación de los lodos dentro del digestor puede hacerse de muchas formas, pero las más utilizadas son la agitación por parte de equipos mecánicos o bombas sumergibles. También puede llevarse a cabo haciendo que el flujo realice una circulación natural por el digestor. La adecuada mezcla del contenido del digestor es importante y persigue los siguientes objetivos:

- Poner en contacto el sustrato fresco con la población bacteriana.
- Proporcionar una densidad uniforme de población bacteriana en todo el volumen.
- Prevenir la formación de espumas, la sedimentación y la formación de espacios muertos que reducirían el volumen útil del digestor.
- Mantener la temperatura uniforme en todos los puntos del digestor.

#### 6. Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)

Es el tiempo que permanece el sustrato en el digestor. El tiempo de retención está íntimamente ligado con otros dos factores: el tipo de sustrato y la temperatura del mismo. La selección de una mayor

temperatura implicara una disminución en los tiempos de retención y por lo tanto en los volúmenes del digestor. Cuanto mayor sea el tiempo de retención, hasta un cierto máximo mayor será el biogás producido para una temperatura seleccionada. Por otra parte el TRH influirá de una manera directa en el volumen total del digestor, ya que a mayor tiempo de residencia de los lodos en el digestor mayor tendrá que ser la capacidad de este, siempre y cuando el sistema de alimentación sea continuo. Así pues el tiempo de retención es uno de los parámetros más importantes a la hora de dimensionar los digestores. A partir del TRH (una vez definido) se obtendrá la velocidad de carga orgánica, que es la cantidad de materia orgánica introducida diariamente en el digestor por unidad de volumen. Existen bibliografías donde se pueden obtener gráficos y tablas que relacionan el TRH con la temperatura y el volumen de biogás generado.

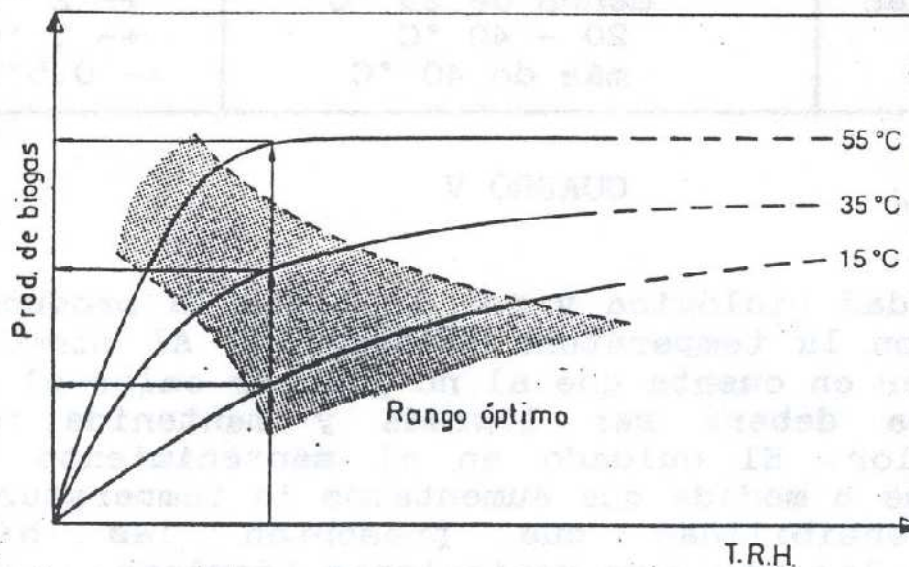


Figura 10 Relación entre el tiempo de retención y la temperatura

### 3.3.4 Tipos de digestores

En este apartado se van a comentar los tipos de digestores existentes, destacando sus principales características, así como el modelo seleccionado para la realización del proyecto.

Se puede hacer una primera clasificación en función del modelo de flujo de carga utilizado:

- Sistema de Batch: se trata de un flujo de carga discontinuo, con carga y vaciado total una vez a trascurrido el tiempo de retención establecido. El principal inconveniente es que es necesario tener tres o cuatro digestores para mantener la producción diaria.
- Sistema de flujo continuo o semicontinuo: el volumen que es ingresado cada cierto periodo en la cámara de digestión desplaza una cantidad equivalente de efluente, que se evacua por un canal de salida. Este efluente evacuado habrá estado en el interior un periodo igual al del tiempo de retención establecido, ya que el volumen del digester habrá sido calculado para este tiempo. Normalmente se cagan a diario. Este modelo de flujo es el elegido para este proyecto ya que permite que el fango generado diariamente en la estación depuradora pueda ser introducido de una manera continua.

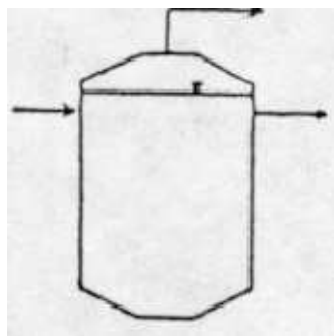


Figura 11 Esquema digester de flujo continuo

Otra clasificación puede realizarse atendiendo al tipo de mezclado del sustrato que se lleva a cabo en el interior del digester:

- Mezclado Completo: se busca que el sustrato existe dentro de la cámara se mezcle de forma total. Suelen ser digestores calefactados, con una agitación de líquidos mediante bombas internas sumergibles o aparatos mecánicos como hélices.
- Mezclado Parcial: se trata de pequeños digestores rurales con agitación manual para impedir solidificaciones.

La siguiente clasificación se realizara atendiendo al mecanismo de contacto entre el sustrato y los microorganismos presentes:

- Contacto anaeróbico: existe una zona a la salida del efluente que permite a las bacterias que salen con el depositarse. De esta manera no se produce una pérdida de microorganismos con el efluente.
- U.A.S.B: en su interior posee separadores o mamparas, en las que las bacterias se depositan impidiendo que salgan con el efluente.
- Lecho fluidificado: existen unas pequeñas partículas en suspensión a las que se adhieren las bacterias, de esta forma permanecen siempre en el interior del digestor.
- Filtro anaerobio: en su interior tienen un medio fijo en el que se depositan las bacterias a modo de filtro. De esta manera el sustrato atraviesa el filtro donde se encuentran las bacterias y mientras se lleva a cabo el proceso de digestión anaerobia.

Por último se podrá establecer una clasificación dependiendo de si el proceso se realiza en una etapa o en varias.

Actualmente los modelos más difundidos para la realización de digestores son el modelo chino y el modelo hindú. Ambos se denominan así por su país de origen.

- **Tipo chino**: se trata de un digestor que funciona en un régimen semicontinuo y suele tener una forma cilíndrica tendiendo a esférica.
- **Tipo hindú**: tiene una cámara de digestión en forma cilíndrica. Sobre la que flota una campana gasométrica que mantiene el biogás a presión constante. Este digestor funciona de forma continua y la carga se realiza de forma diaria. el principal inconveniente es que su construcción resulta más cara.

### **3.4 Dimensionado del digestor**

En este apartado se explicará cual ha sido el tipo de digestor seleccionado para la realización del proyecto, así como las partes que lo componen y por último el proceso de dimensionado del digestor.

#### **3.4.1 Digestor seleccionado.**

En el caso del proyecto se va a realizar la instalación de un digestor de tipo mixto entre ambos modelos (chino e hindú), se tratará de un digestor con forma cilíndrica que será alimentado por un flujo continuo diariamente y se realizará una digestión con mezcla completa. Este tendrá una cámara o depósito de alimentación donde se añadirá el agua a los fangos hasta conseguir el porcentaje de dilución adecuado (aproximadamente 8% de materia). De la misma manera dispondrá de una cámara de evacuación, por donde saldrá el efluente que podrá ser retirado hasta su destino final. El digestor estará semienterrado con el objetivo de reducir el impacto visual de la instalación, pero sobre todo para que se pierda el menor calor posible a través de las paredes y también para facilitar la carga del mismo.

Al encontrarse el digestor semienterrado las cámaras de carga y evacuación estarán situadas por encima de este nivel lo que facilitará su llenado y su evacuación, debido a la acción de la propia presión hidrostática generada por el sustrato cuando es introducido en el digestor.

A diferencia del modelo hindú se ha decidido que no exista una campana de gases móvil, ya que su instalación supone un gasto adicional muy importante. La presión del biogás generado será controlada por diferentes válvulas que permitirán la salida del biogás hacia los depósitos de almacenamiento cuando la presión de este sea elevada.

En definitiva la instalación será parecida a la de la figura, con la diferencia de que la cámara de digestión será cilíndrica y no estará completamente enterrada.

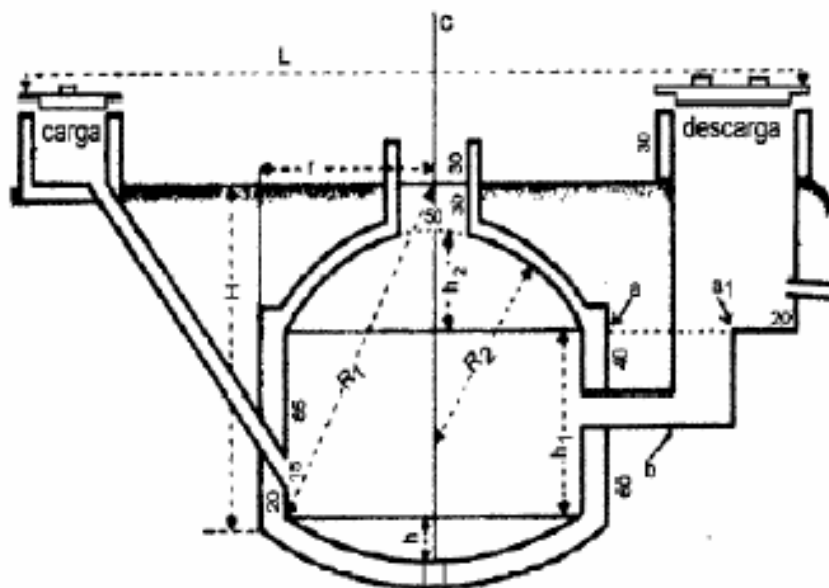


Figura 12 esquema básico de un digester de flujo continuo

### 3.4.2 componentes de la instalación y funcionamiento

La instalación se compone de las siguientes partes:

#### 1. Sistema de alimentación

Deben ser tales que aseguren una provisión rápida de materia prima evitándose así la descomposición aeróbica. Para este sistema de alimentación se utilizarán un conjunto de bombas tanto de pozo como bombas mecánicas de desplazamiento positivo o alternativas, ya que el sustrato que se utiliza en la digestión es un fluido no newtoniano. Por ello las bombas deberán ser seleccionadas atendiendo a la viscosidad del fluido, la cantidad de sólidos existente, caudales...etc. Para el flujo del fango hacia la cámara de carga se seleccionarán bombas de pozo, mientras que para el flujo de agua se utilizarán bombas centrífugas.

#### 2. Cámara de carga

El sustrato se almacena en una cámara de carga antes de su ingreso en el digester. Esta cámara deberá ser capaz de almacenar el volumen de más de un día de carga, generalmente el volumen de esta cámara será el correspondiente a dos-tres días de carga. En esta

cámara o se añadirá la cantidad de agua necesaria para obtener la dilución adecuada, en nuestro caso de un 8%.

### 3. Tuberías y canales

Serán los encargados de transportar los fangos desde la cámara de carga hasta el digestor y posteriormente hasta la cámara o depósito de descarga

### 4. Cámara de digestión

Aquí es donde se lleva a cabo la digestión anaerobia, se tratará de un depósito de hormigón con forma cilíndrica y parcialmente enterrado, estará recubierto por una capa aislante para reducir así la pérdida de calor y también de una capa de chapa corrugada. Contará también con dos agitadores mecánicos que removerán los fangos del interior, evitándose así la existencia de zonas muertas. Deberá cumplir los siguientes requisitos:

- Tendrá que ser impermeable al agua y al gas, para evitar pérdidas de líquido de digestión, con el consecuente peligro de contaminación y la pérdida de gas que disminuiría la eficiencia de la instalación
- Tendrá que ser aislante térmico. Las pérdidas de calor deben ser evitadas al máximo, puesto que el mantenimiento de la temperatura del digestor es logrado con el aporte externo de calor y por tanto todo ahorro en este sentido se traducirá en un ahorro de energía
- Estabilidad estructural. El depósito diseñado tendrá que soportar las cargas estáticas y dinámicas.
- Debe estar provisto de mecanismos de agitación, como hélices, bombas soplantes o circulación natural.
- Debe estar provisto de un sistema de calefacción interno.

### 5. Cámara de descarga

Al igual que la de carga, existe una cámara de descarga donde se depositan los fangos que salen del digestor una vez digeridos.

### 6. Estación de compresión del biogás

Esta zona de la instalación estará dedicada al tratamiento del biogás para que posteriormente sea quemado en el motor cogenerador.

Dispondrá de un sistema de seguridad compuesto por una antorcha necesaria en cualquier instalación de gas.

7. Deposito de almacenamiento del biogás

8. Zona de cogeneración eléctrica

En esta zona de la instalación es donde están ubicados los equipos e generación térmica y eléctrica, además de los filtros necesarios para purificar el biogás.

9. Sistemas térmicos

Son aquellos sistemas necesarios para elevar la temperatura del digestor. Estarán compuestos por un circuito de tuberías y las correspondientes bombas de circulación.

A continuación se llevara a cabo la explicación del funcionamiento del biodigestor y de cada una de sus partes.

En primer lugar y una vez acabado el proceso de depuración se obtienen los fangos, estos fangos son transportados diariamente a la cámara de carga. Como su porcentaje de materia seca es de entorno al 20% se les añade agua mediante una bomba centrífuga hasta conseguir el nivel de dilución óptimo del 8%. Una vez que la dilución es adecuada estos fangos son cargados o transportados a la cámara de digestión mediante una bomba de pozo. La carga se realiza de manera continua en la medida de lo posible atendiendo a los parámetros de diseño seleccionados, como por ejemplo el caudal de afluente diario y el tiempo de permanencia en el digestor. Dentro de la cámara de digestión se lleva a cabo la descomposición anaerobia durante el periodo de tiempo seleccionado (TRH), mientras los fangos se encuentran en interior son movidos continuamente por dos agitadores mecánicos y calentados mediante un sistema de tuberías calefactadas por donde circula el agua caliente que procede de la refrigeración del motor, estas tuberías se encuentran situadas en la pared interna del depósito. Una vez realizada la digestión anaerobia el efluente es evacuado a la cámara de descarga de manera continua.



El biogás generado en el proceso abandona el depósito por las tuberías situadas en la parte superior, de ahí se dirige a la estación de compresión donde un compresor lo comprime para poder ser almacenado en los depósitos. La existencia de depósitos es necesaria para poder almacenar el biogás que se genera en caso de que este no pudiera ser quemado directamente por averías de la estación cogeneradora. Después del paso por los depósitos el biogás se envía al generador de electricidad, pero antes pasa por unos filtros especiales donde se limpia y elimina el exceso de agua y los sulfuros que contiene.

Por último el biogás es quemado en el generador donde se obtiene energía eléctrica y energía térmica que es utilizada para calentar el circuito de calefacción del digestor. En lo que respecta al efluente este puede ser venido como enmienda orgánica.

### **3.4.3 Cálculos realizados y dimensionamiento**

En este apartado se va a exponer y explicar los cálculos necesarios para el dimensionamiento del digestor. Es necesario distinguir entre el dimensionamiento del volumen del digestor propiamente dicho y el resto de instalaciones y equipos seleccionados, ya que del volumen del depósito de digestión dependerán el resto de los parámetros como el volumen de biogás generado y por lo tanto el tamaño de los motores, bombas, depósitos...

Como se ha comentado anteriormente el proceso de digestión depende de muchos factores. Los más importantes son la temperatura de operación del digestor y el tiempo de retención seleccionado. Así por ejemplo cuanto mayor sea la temperatura de operación y el tiempo de retención más cantidad de biogás se generará para un mismo volumen de afluente.

De esta forma lo primero que hay que llevar a cabo es definir las variables de diseño, que en este caso serán las siguientes:

- La cantidad de biomasa disponible (Qd):

Se trata de la cantidad de fango generado en la instalación. Según los datos de funcionamiento el volumen de fangos generado al año (2012) en la instalación es de 2029 t, lo que corresponde a una cantidad diaria de:

$$Qd = 5.55 \text{ t/día}$$

A partir de este dato se obtendrá el volumen de afluente diario en la instalación, así como otros parámetros secundarios necesarios.

- TRH(tiempo de retención hidráulico) y Temperatura de operación:

Estos dos parámetros están muy relacionados entre sí, de la elección de uno de ellos dependerá el otro. En la siguiente tabla se puede observar los distintos rangos de trabajo que existen para un digester anaerobio y el rango de temperaturas que cada uno de ellos tiene asociado.

Rango T <sup>a</sup>	Mínimo	Optimo	Máximo	TRH (días)
Psicrofílico	4-15°C	15-25°C	25-30°C	+100
Mesofílico	15-20°C	20-35°C	35-45°C	30-60
Termofílico	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15

Tabla 4 Rangos de temperaturas en la digestión anaerobia

Atendiendo a los datos de la tabla y una vez consultada gran cantidad de bibliografía, así como distintos estudios y proyectos realizados similares al desarrollado, se ha decidido que el digester trabaje en un rango e temperaturas mesofílico. El rango mesofílico es el más extendido, ya que es el que más rentable resulta. Esto se debe principalmente a que el termofílico precisa de mucha temperatura para desarrollarse y únicamente es viable en grandes instalaciones con grandes producciones eléctricas, y el Psicrofílico necesita un tiempo de retención muy elevado, haciéndolo inviable a desde el punto de vista económico.

De esta manera las otras dos variables de diseño seleccionadas serán:

$$TRH = 30 \text{ dias}$$

$$T^a = 25 - 30^{\circ} C$$

Una vez han sido seleccionadas las variables de diseño se puede continuar con el proceso de dimensionado del digestor. El siguiente paso será calcular el afluente diario (A) que se introducirá en el digestor. Para ello se partirá de la cantidad de biomasa disponible por día. El problema es que tal como sale del proceso de depuración el fango tiene unas proporciones de un 20.2% de materia seca y un 79.8% de agua, o lo que es lo mismo el fango tiene una sequedad del 20.2%. Para que el funcionamiento sea óptimo el afluente tendrá que tener una sequedad o dilución (D) del 8%, y por ello será necesario añadir un determinado volumen de agua al fango. De esta manera el afluente diario será la suma de la cantidad de biomasa diaria disponible mas el volumen de agua (Vm) que hay que aportar.

$$A = Qd + Vm \quad (1.1)$$

Si calculamos la materia seca que existe en el Qd obtendremos:

$$MSd = Qd * 0.202 = 1.1216 t$$

De esta manera la ecuación para calcular el afluente diario será:

$$A = \frac{Qd * \%sequedad}{D} = \frac{MSd}{D}$$

$$A = \frac{1.1216}{0.08} = 14.03 [t/dia]$$

Una vez obtenido el Afluente podemos calcular la cantidad de agua que es necesario añadir para conseguir la dilución del 8% con la ecuación (1.1)

$$Vm = A - Qd$$

$$Vm = 14.03 - 5.55$$

$$Vm = 8,472 \frac{t}{dia} = 8,472 \frac{m3}{dia}$$

Como la dilución es un valor muy pequeño, y dado que la densidad del agua es de un kilogramo por litro podemos aproximar el afluente en metros cúbicos.

$$A = 14.03 \frac{m3}{dia}$$

A partir del afluente obtenido y con otra de las variables de diseño del digester anaerobio se obtiene el volumen útil del depósito de digestión, ya que este tendrá que tener un volumen por lo menos igual al producto del afluente diario por los días que este tendrá que estar en el interior del depósito. Esto es debido a que al tratarse de un sistema de alimentación continuo el afluente va introduciéndose en la cámara a diario.

De esta manera se tendrá la siguiente ecuación:

$$Vd = A * TRH [m3] \quad (1.2)$$

$$Vd = 30 * 14.03$$

$$Vd = 420.8 [m3]$$

Una vez calculado cual tiene que ser el volumen total del digester tendrán que obtenerse sus medidas características, dado que el depósito va a tener forma cilíndrica las medidas que habrá que calcular serán la altura y el radio o diámetro de la base.

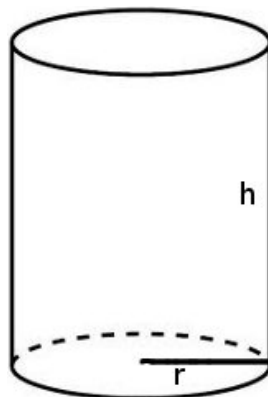


Figura 13 variables de diseño del depósito

Por motivos de seguridad para evitar sobrepresiones del gas es necesario dejar un espacio de 0.5 metros de altura entre la superficie del lodo en el interior del tanque y el techo del mismo. Se ha decidido que la altura total del depósito serán 4 metros, además como se ha comentado anteriormente para facilitar el llenado y la evacuación del afluyente el depósito se encontrará semienterrado hasta una profundidad en el fondo de 2.5 metros. Teniendo en cuenta eso y la fórmula del volumen del cilindro se puede calcular el radio o diámetro que tendrá que tener el tanque mediante las siguientes ecuaciones:

$$Vd = \pi R^2(h - 0.5) \quad (1.3)$$

Despejando el radio en la ecuación anterior (1.3) se obtiene el valor del radio

$$R = \sqrt{\frac{Vd}{\pi(h - 0.5)}}$$

$$R = 6.186 \text{ m}$$

$$Di = 12.372 \text{ m}$$

Se obtiene así un depósito de un volumen de 420.8 metros cúbicos una altura de 4 metros y un diámetro de 12.4 metros.

- **Dimensionado de las cámaras de carga y descarga**

Se tratará de dos cámaras o depósitos de hormigón con forma de paralelepípedo. Al igual que la cámara de digestión se encontrarán parcialmente enterradas hasta una profundidad de 1 metro. En ellas estarán situadas dos bombas de pozo, una en cada una, para impulsar el afluyente hasta los canales de entrada al digestor. El volumen necesario que tendrán que tener estas cámaras es por lo menos el equivalente al afluyente de dos días, es decir, unos 28 m<sup>3</sup>. Teniendo en cuenta lo anterior las dimensiones seleccionadas serán:

$$a = 4 \text{ m} \quad b = 3 \text{ m} \quad c = 2.5 \text{ m}$$

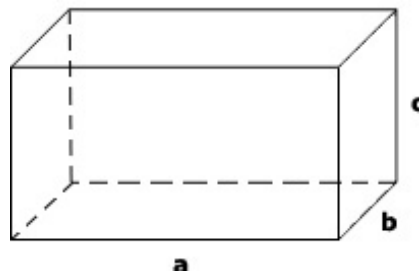


Figura 14 parámetros de diseño de las cámaras

- **Forma constructiva, esquema y materiales de la instalación.**

A diferencia del resto de equipos estas instalaciones requieren ser construidas a medida, por ello existe una gran cantidad de formas y materiales que pueden ser utilizados. En el caso de este proyecto, y una vez calculadas las dimensiones, se ha elegido realizar un depósito de hormigón armado con forma cilíndrica y enterrado parcialmente hasta una profundidad de 2.5 m. este depósito tendrá un pilar central de 80 cm de diámetro y una pasarela central (1.5 metros de anchura y 30 cm de espesor) a lo largo del diámetro, similar a la de la siguiente figura.



Figura 15 Interior de un digestor

Esta pasarela permitirá la instalación de los dos agitadores mecánicos, uno a cada lado del pilar central así como el acceso a los operarios para posibles operaciones de mantenimiento. La parte superior del depósito estará cerrada de manera estanca por una tela plástica especial para este tipo de depósitos (como se muestra en la figura anterior), además existirán una serie

de pasarelas y escaleras metálicas por la parte exterior para el acceso a los sistemas de válvulas y salida del gas, situados en la zona central. La parte exterior del depósito estará recubierta por dos capas de aislante de poliuretano de 4 cm y la parte lateral visible estará recubierta por una chapa corrugada de 1 mm, de manera similar a la que se muestra en la siguiente figura.



Figura 16 Exterior del depósito de digestión

Por otra parte el depósito estará formado por una losa inferior de hormigón armado de 40 cm de espesor, sobre una capa de grava y aislante. Los muros laterales también serán de hormigón armado del mismo espesor. Además de todo ello existirá una zapata inferior de otros 40 cm e espesor y 1 metro de ancho. Por último hay que tener en cuenta que para realizar la obra habrá que realizar un movimiento de tierras de 3 metros de profundidad y 7 metros de diámetro.

En lo que respecta a las cámaras de carga y descarga serán de hormigón armado de 30 cm de espesor. En la siguiente imagen se puede observar un pequeño dibujo esquemático de la instalación.

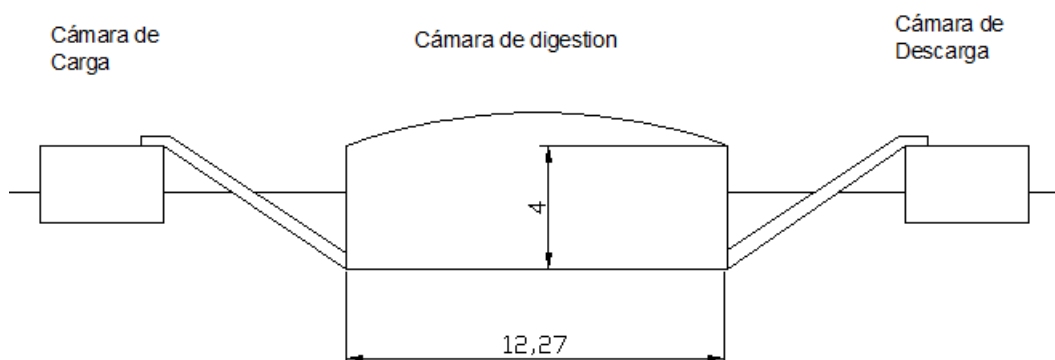


Figura 17 esquema de la instalación

### 3.5 Producción de Biogás en la instalación

En este apartado una vez definido el tamaño y las dimensiones de la instalación se va a proceder a realizar los cálculos para obtener el volumen de biogás que se genera en el digestor a la temperatura y durante el tiempo de retención seleccionado. También se realizara una explicación básica de cuál es el funcionamiento de la instalación de gas y las etapas que pasas este hasta que llega al cogenerador. Por último se detallarán cuales son las instalaciones necesarias para mantener la seguridad.

#### 3.5.1 Caudal de biogás generado y propiedades

Para calcular el caudal diario de biogás generado en la instalación es necesario saber cuánto volumen de biogás se genera por cada kg gramo de masa seca del afluente. Esta cantidad de biogás dependerá de muchos factores como los de diseño mencionados anteriormente, pero sin duda uno de los factores que más afecta es el tipo de sustrato utilizado. Así pues la cantidad de biogás variará en función del tipo de materia orgánica que se utilice como afluente del digestor, en el caso de dicho estudio los fangos producidos en la depuradora. Existe gran cantidad de bibliografía con estimaciones de estas cantidades. En este caso y como se puede ver en la tabla se ha utilizado una cantidad de biogás generado por kilogramo de masa seca (Bgms) de 450 l/kgms.

Sustrato	Promedio (l/Kg masa seca)
Excreta porcina	450
Lodos de aguas residuales	450
Excreta vacuna	250
Excreta de oveja	200
Paja seca de cereales	250
Algas	460
Restos de maíz	410

Tabla 5 cantidad de Biogás Generada dependiendo del tipo de sustrato



De esta forma para obtener el volumen diario generado habrá que calcular primero la cantidad de masa seca que se introduce cada día en el digestor, es decir, calcular los kilogramos de masa seca que hay en el afluente.

Como se calculo anteriormente el afluente diario es el siguiente:

$$A = 14.03 \frac{m^3}{dia} \sim 14.03 \frac{t}{dia}$$

Como el porcentaje de dilución es del 8% podemos aproximar los metros cúbicos de lodo a toneladas, suponiendo como densidad la del agua. Para obtener los kilogramos de masa seca multiplicamos el afluente por la dilución de los lodos:

$$Ms_{dia} = A * D = 14.03 * 0.08 = 1.122 \frac{t}{dia} = 1122 \frac{kg}{dia}$$

Una vez que se obtiene la cantidad de masa seca, solo queda multiplicar por la cantidad diaria promedio estimada:

$$Bg = 450 \frac{l}{KgMS} * 1122 \frac{KgMS}{dia} = 504959 \frac{l}{dia}$$

$$Bg = 504.959 \frac{m^3}{dia}$$

Así pues se obtiene una cantidad de 504.959 metros cúbicos de biogás por día. Esta cantidad se encuentra dentro de los márgenes ya que se estima que se producen entorno a 29 metros cúbicos de biogás por cada mil habitantes y día, dado que la ciudad de Barbastro cuenta con 17.304 habitantes, el valor obtenido puede darse por valido.

- **Propiedades del Biogás**

Una vez se ha obtenido cuanto volumen de biogás se genera en la instalación, queda hacer una estimación aproximada de cuáles serán sus características, es decir, principalmente cual será su concentración de distintos

gases y su poder calorífico. De estas dos variables dependerá el consumo del motor y por tanto de la instalación.

El biogás es una mezcla de distintos gases cuyas proporciones oscilan entre 50-70% de metano (CH<sub>4</sub>), 20-30% de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) y otras pequeñas porciones de gases como hidrogeno y sulfuro de hidrogeno. Dependiendo de la concentración de estos gases, especialmente el metano, el poder calorífico del biogás será mayor o menor y por lo tanto variara el consumo.

En la siguiente tabla (tabla 6) se puede observar cuales son las principales características del biogás.

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
Valor calórico	5000-5600 kcal/m <sup>3</sup>
T <sup>a</sup> ignición	650-750°C
Presión critica	7.5-8.9 MPa
Densidad relativa	0.83

Tabla 6 Características del Biogás

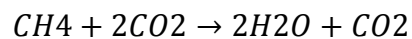
En el caso de este proyecto se ha estimado la siguiente composición del biogás.

<b>Componente</b>	<b>Proporción (%)</b>
Metano (CH <sub>4</sub> )	65
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	30
Hidrogeno (H <sub>2</sub> )	1
Otros (sulfuros, agua, oxigeno)	4

Tabla 7 Composición Porcentual del Biogás

Definida la composición del biogás, el siguiente paso es calcular el poder calorífico de dicho biogás. Para la realización de este estudio se tendrá en cuenta únicamente el poder Calorífico inferior (PCI). El poder calorífico inferior es la cantidad de calor desprendida en la combustión completa a presión atmosférica, de la unidad de masa o volumen de un combustible medido en condiciones normales, suponiéndose que el agua producida en la combustión se encuentra en fase gaseosa.

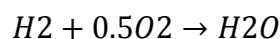
Este poder calorífico será la suma ponderada de los poderes calorífico individuales del hidrogeno y el Metano, ya que el resto no tienen. El poder calorífico se calcula ajustando las reacciones de combustión de cada uno de los dos elementos (CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>) y calculado la diferencia de entalpias entre reactivos y productos, exceptuando el oxígeno.



Al calcular la diferencia de entalpias en la reacción ajustada se obtiene que el Poder Calorífico Inferior del Metano es de:

$$PCI_{metano} = 7737 \frac{kcal}{m^3}$$

De la misma manera se puede obtener el poder calorífico del hidrogeno



$$PCI_{hidrogeno} = 1612 \frac{kcal}{m^3}$$

Realizando la suma ponderada de ambos se obtiene el poder calorífico del biogás.

$$PCI_{bg} = 0.65PCI_{metano} + 0.01PCI_{hidrogeno}$$

$$PCI_{bg} = 5045 \frac{kcal}{m^3}$$

Una vez calculado el poder calorífico del biogás que se genera, también se podrán obtener los consumos de los motores y por consiguiente la energía diaria generada en la instalación. Como los cálculos han sido realizados sobre una estimación de la concentración de los distintos gases se han desarrollado una serie de gráficos y tablas en el programa (EES) para poder obtener el Poder Calorífico del Biogás en el caso de que estas concentraciones variaran. En los siguientes gráficos (figura 18 y grafico 1) se puede observar como varia el poder calorífico del biogás en función de la concentración de metano existente.

1.10	1 Y <sub>met</sub>	2 PCI <sub>bg</sub>
Run 1	0,4	3111
Run 2	0,45	3498
Run 3	0,5	3885
Run 4	0,55	4272
Run 5	0,6	4658
Run 6	0,65	5045
Run 7	0,7	5432
Run 8	0,75	5819
Run 9	0,8	6206
Run 10	0,85	6593

Figura 18 Tabla PCI Biogás-%metano

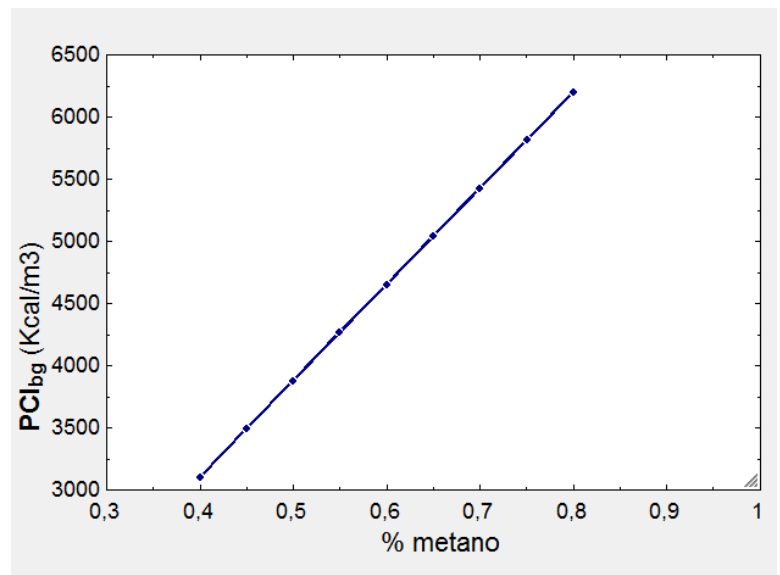


Gráfico 1 PCI Biogás-%metano

Como se puede apreciar el poder calorífico aumenta de una manera lineal a medida que aumenta el contenido en metano del mismo. En nuestro caso el contenido es de un 65% con lo que obtenemos un poder calorífico que si pasamos a unidades de Kwh/m<sup>3</sup> es de:

$$PCI_{bg} = 5.86 \frac{kWh}{m^3}$$

### 3.5.2 instalaciones, limpieza y almacenaje del biogás.

Obtenido el caudal y el tipo de biogás lo siguiente es explicar los procesos que se deben aplicar al gas para acondicionarlo, así como el funcionamiento y el recorrido del gas por la instalación.

- Funcionamiento y partes de la instalación

La instalación del biogás estará formada por un conjunto de elementos para controlar el correcto funcionamiento de la planta y garantizar la seguridad. Los equipos de esta instalación serán:

- Tuberías de conducción y valvulería: este equipamiento es necesario para guiar y controlar el flujo de biogás desde el digestor hasta los tanques de almacenaje
- Compresor de biogás: comprime el gas hasta una presión de 10 bar para poder ser almacenado
- Depósitos de almacenamiento: son dos, uno de 19 m<sup>3</sup> y otro de 16 m<sup>3</sup>. Estos depósitos permiten almacenar un volumen equivalente a 16 horas de producción, en caso de avería de los motores el biogás puede ser almacenado en ellos evitándose pérdidas. Pero la función más importante del almacenamiento del biogás es que permite un suministro a caudal constante a los motores de cogeneración.
- Antorcha: se trata de un sistema de seguridad necesario en cualquier instalación de gas. Permite que en casos extremos, como fugas, averías graves... el biogás del sistema sea quemado de forma automática y expulsado al exterior, evitándose posibles explosiones.
- Filtros de biogás: estarán situados en la entrada de los equipos de generación y permiten una total limpieza del biogás.

El funcionamiento de la instalación es el siguiente, en primer lugar el biogás se genera en la cámara de digestión, se va almacenando en el interior del tanque gracias a la membrana de almacenamiento de gas

instalada en la parte superior del digestor. Este gas sale del digestor y es conducido a través de las tuberías hasta el compresor que aumenta su presión hasta 10 bar para ser almacenado, posteriormente es conducido por los filtros que los limpian y purifican, una vez tratado el gas se introduce en el depósito, desde donde se va liberando de una manera continua por las tuberías de alimentación de los motores cogeneradores.

- Limpieza y tratamiento del biogás

El gas tal cual sale del digestor debe ser acondicionado a fin de asegurar un permanente y buen funcionamiento de los equipos. Los distintos procesos que se realizan en los filtros son:

- Drenaje de agua: cuando sale del digestor el biogás está saturado de agua a medida que se enfría se condensa en las cañerías y si no se evacua puede causar problemas. Por esta razón las tuberías deben ser instaladas con una pendiente del 1% hacia un recipiente denominado trampa de agua donde se extrae.
- Eliminación del CO<sub>2</sub>: el dióxido de carbono no tiene ningún poder calorífico y debe ser calentado en la combustión. Su eliminación es aconsejable en casos de almacenamiento de gas a altas presiones debido a que es inútil gastar energía en su compresión y calentamiento.
- Eliminación de H<sub>2</sub>S: algunos sistemas requieren que el gas a utilizar este libre de SO<sub>2</sub> ya que este combinado con el agua da como resultado ácido sulfhídrico que provoca corrosión.

Para llevar a cabo la limpieza del biogás se hará pasar a este por una serie de filtros que contienen hidróxido de hierro que reaccionara con el H<sub>2</sub>S para eliminarlo del biogás. Así pues se dispondrán tres equipos de filtrado en la instalación a la dos a la entrada de los equipos de generación.

### **3.6 Producción de electricidad y aprovechamiento de calor**

Existen muchos usos a los que se puede aplicar el biogás, en motores para generar electricidad, en plantas cogeneradoras para además de generar electricidad aprovechar el calor para otros procesos, en quemadores con el único objetivo de producir calor, así como en muchas más aplicaciones más pequeñas como en hornos o lámparas.

En el caso de este estudio el biogás que se genera será empleado como combustible de una instalación cogeneradora, que producirá electricidad y calor que se aprovechara para calentar el digestor. En este apartado se va a explicar los motores seleccionados y el funcionamiento de instalación eléctrica y como se puede aprovechar el calor generado.

#### **3.6.1 motores y sistema de cogeneración**

El biogás puede ser quemado en muchos artefactos, descomponiéndose principalmente el  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . Un motor de biogás consume aproximadamente  $0.5 \text{ m}^3/\text{kWh}$ , con rendimientos de entre 25-30%. Como se ha dicho anteriormente la presencia de  $\text{H}_2\text{S}$  puede dañar las válvulas por lo que es necesario eliminarlo del sistema. En los sistemas de cogeneración la potencia mecánica provista por el eje del motor es aprovechada para generar electricidad a través de un generador. Simultáneamente y a través de una serie de sistemas de intercambio de calor ubicados en los sistemas de refrigeración (agua y aceite) del motor y en la salida de los gases de escape, se recupera energía térmica.

En la combustión interna y según numerosas bibliografías se puede lograr un mayor aprovechamiento de la energía. Así del 100% de la energía suministrada, aproximadamente un 28.4% se transforma en energía mecánica, un 68% en energía térmica (de la que se recupera un 66%) y el 3.6% restante se trata de combustible no quemado.

Para esta instalación se ha elegido instalar dos motores de cogeneración para que funcionen en dos turnos para evitar así posibles sobrecargas.

- **Motores**

Para la elección de los motores de cogeneración se ha seleccionado entre dos opciones de potencia de motor: 45kW y 58 kW. La potencia eléctrica elegida ha sido 45kW, por lo que se instalarán dos estaciones cogeneradoras de una potencia eléctrica de 45 kW, que funcionaran en dos turnos diarios cuyo tiempo se calculara en los siguientes apartados.

Uno de los principales motivos por los que se ha elegido el motor de 45 kW y no el de 58 kW es que el consumo de este último es demasiado grande por lo que el funcionamiento sería menos continuo.

### Opción 1

- Características del motor

Se trata de un motor cogenerador CHP OEKO 45BG del grupo nova energía de 45kW de potencia eléctrica. Sus dimensiones son de 1.8x1.0x1.7 m, a continuación se muestra la ficha técnica y una imagen del motor cogenerador.



Figura 19 Motor de Cogeneración



Figura 20 Motor de cogeneración



<b>Ficha técnica</b>	
Marca	Grupo Nova energía
Modelo	CHP OEKO 45 BG
<b>Potencias de salida</b>	
Eléctrica	45 kW
Térmica	72 kW
Energía de entrada	135 kW
<b>Eficiencia</b>	
Eléctrica	33.3 %
Térmica	53.3 %
Total	86.6 %
<b>Temperaturas</b>	
Salida máxima	85-90°C
Entrada máxima	70°C
<b>Dimensiones</b>	
	1.8x1.0x1.7m

Tabla 8 Ficha técnica motor 45kW

- Consumo del motor y tiempo de funcionamiento

El siguiente paso a realizar una vez seleccionado el cogenerador, sabiendo cual es la energía de entrada que este necesita y el poder calorífico del biogás, es calcular el consumo en metros cúbicos de biogás del motor para poder definir las horas de funcionamiento diarias de los motores así como la duración de cada uno de los turnos de funcionamiento. Para calcular el consumo (C) es necesario aplicar la segunda ecuación:

$$C = \frac{Pot\ entrada}{PCIbg}$$

$$C = \frac{135}{5.86} = 23.03 \frac{m^3}{h}$$

Con el valor del consumo del motor y el volumen de biogás generado diariamente se obtiene la cantidad de horas de funcionamiento diarias.

$$Hf = \frac{Bg}{C} = \frac{504.9}{23.03} = 21.9 \frac{h}{dia}$$

Para saber cual el porcentaje de funcionamiento diario se define el coeficiente Cff (coeficiente de funcionamiento):

$$Cff = \frac{Hf}{24} = 0.9133$$

Para como el tiempo de funcionamiento diario es de 21.93 horas se establecerían turnos de diez horas de funcionamiento para cada motor y así evitar posibles recalentamientos y averías.

## Opción 2

### - Características del motor

Se trata de un motor cogenerador CHP OEKO 60BG del grupo nova energía de 58kW de potencia eléctrica. Sus dimensiones son de 2.0x1.0x1.7 m, a continuación se muestra la ficha técnica y una imagen del motor cogenerador.

<b>Ficha técnica</b>	
Marca	Grupo Nova energía
Modelo	CHP OEKO 45 BG
<b>Potencias de salida</b>	
Eléctrica	58 kW
Térmica	82 kW
Energía de entrada	175 kW

<b>Eficiencia</b>	
Eléctrica	33.14 %
Térmica	46.8 %
Total	79.99 %
<b>Temperaturas</b>	
Salida máxima	85-90°C
Entrada máxima	70°C
<b>Dimensiones</b>	1.8x1.0x1.7m

Tabla 9 Ficha Técnica motor 60kW

- Consumo del motor y tiempo de funcionamiento

$$C = \frac{Pot\ entrada}{PCIbg}$$

$$C = \frac{175}{5.86} = 29.86 \frac{m^3}{h}$$

Con el valor del consumo del motor y el volumen de biogás generado diariamente se obtiene la cantidad de horas de funcionamiento diarias.

$$Hf = \frac{Bg}{C} = \frac{504.9}{29.86} = 16.9 \frac{h}{dia}$$

Para saber cual el porcentaje de funcionamiento diario se define el coeficiente Cff (coeficiente de funcionamiento):

$$Cff = \frac{Hf}{24} = 0.7044$$

Para como el tiempo de funcionamiento diario es de 16.9 horas se establecerían turnos de 8.5 horas de funcionamiento para cada motor y así evitar posibles recalentamientos y averías

### Opción elegida Régimen de funcionamiento

- **Opción 1**
- **Cogeneradores de 45 kW de potencia eléctrica y 72 kW de térmica**
- **22 horas diarias en turnos de 11 horas cada cogenerador**

Si por el contrario hubiéramos escogido el motor de 58 kW el consumo obtenido para esta potencia sería de 29.87 metros cúbicos por hora y con este consumo se obtendrían unas horas de funcionamiento diarias de 17 h, por lo que el funcionamiento sería mucho más discontinuo, lo que provocaría que no se generara calor de forma continua y como la diferencia en energía diaria generada diaria es mínima y el precio del segundo es más elevado, se ha preferido desarrollar la opción 1. Ambos sistemas incorporan un panel de mandos de dimensiones de 1x2x0.4m.

### **3.6.2 Producción eléctrica diaria y aprovechamiento térmico**

En este apartado se llevará a cabo el cálculo de la energía eléctrica generada cada día con el volumen de biogás que abastece a los motores cogeneradores. Además también se explicará el sistema de aprovechamiento de energía térmica y una explicación aproximada de la instalación necesaria.

#### -Cálculo de la producción Eléctrica diaria.

Para llevar a cabo este cálculo basta con multiplicar las horas de funcionamiento diarias del sistema de cogeneración por la potencia que desarrolla dicho sistema, así se obtiene lo siguiente:

$$Ed = Hf * 45kW = 21.93 * 45 = 986.85 kWh$$

En apartados anteriores se realizó una estimación de cuál era el gasto energético de la estación depuradora obteniéndose un consumo energético de:

$$Ct = 3278.5 \text{ kWh}$$

De esta manera, y sin contar los gastos eléctricos que añadidos del sistema de digestión se cubriría un porcentaje de la demanda (%EC) de:

$$\%EC = \frac{986.85 * 100}{3278.5} = 30.10\%$$

- Sistema de aprovechamiento de calor

El sistema cogenerador aporta una energía térmica de 72 kW a través de intercambiadores de calor situado alrededor de motor y de la salida de los gases de escape. La temperatura de salida del agua del circuito de aprovechamiento térmico tendrá una temperatura de 85°C. Este caudal de agua será impulsado por bombas de circulación a través del sistema de tuberías de calefacción que se instalaran por el interior del digester lo que permitirá mantener la temperatura de funcionamiento. Como se comento en apartados anteriores el digester estará cubierto por una capa de aislamiento térmico para evitar fugas de calor a través de la estructura. El sistema de calefacción consistirá en una especie de serpentín colocado por el interior de las paredes del depósito a una distancia de separación de 20cm. Si se calcula la longitud de la circunferencia del digester y la cantidad de filas que se introducirían en cuatro metros de altura, se obtiene que la longitud de tubería necesaria para la instalación será de 1200 m.

El tipo de tubería elegido puede ser de muchas clases desde cobre, que resultara más cara pero transmitirá mejor el calor, hasta tubería de doble capa, más barata pero menos eficiente.

### 3.7 Efluente del digestor

El proceso fermentativo y de producción del biogás no extrae más que carbono, trazas de azufre, hidrogeno y algo de nitrógeno en forma de NH<sub>3</sub>. El efluente carece prácticamente de olor debido a que las sustancias que lo provocan son reducidas casi en su totalidad.

La relación carbono/nitrógeno se ve reducida mejorando de forma general el efecto fertilizante del efluente. Todos los nutrientes utilizados por los vegetales de una manera importante (nitrógeno, fosforo, potasio y magnesio) son preservados durante el proceso de fermentación.

- Efecto sobre el suelo: debido a su rápida descomposición el efluente brinda rápidamente sus nutrientes disponibles. Los ácidos presentes en este material contribuyen a mejorar la estructura del suelo y su porosidad, aumentando la capacidad de intercambio. La cantidad de humus es casi el doble que la que se obtiene al utilizar estiércoles.
- Efecto sobre los cultivos: existen evidencias del incremento en la producción de distintas especies provocada por la aplicación del efluente al suelo. El tratamiento de los desechos por vía anaerobia elimina la acumulación de estos evitando la proliferación de organismos peligrosos. El proceso produce la eliminación al 90% de los patógenos
- Otros usos: el efluente de los digestores tiene otras aplicaciones entre las cuales pueden mencionarse la preparación de compost y la alimentación de algas y peces.

En lo que hace referencia al aspecto económico de la venta del efluente a distintas empresas de compostaje, no se va a tener en cuenta, ya que en la actualidad la Edar de Barbastro ya vende los lodos que genera y por lo tanto la venta de los que se generarían en la instalación no supondría un ingreso extra.

### 3.8 equipamiento de la instalación.

En este apartado se van a enumerar y explicar las características de cada uno de los equipos que formarían parte de la instalación y que no tienen que ser construidos, tanto los de la instalación del digester como los de la instalación de gas y eléctrica.

#### Instalación del Digestor

- Bomba centrífuga SACI HK 25 M  
Caudales de 12-36 m<sup>3</sup>/h  
Potencia: 0.75 kW  
Presión de Salida: 16 m.c.a máx.  
Esta bomba se utilizara para llenar aportar el caudal de agua necesario en la cámara de carga.



Figura 21 Bomba centrífuga

- 2 Bombas de Pozo CALPEDA GMC 50 BE  
Caudales de 12-36 m<sup>3</sup>/h  
Potencia: 1.5 kW  
Presión de Salida: 12 m.c.a máx.  
Se utilizara en los pozos de carga y descarga.



Figura 22 Bomba de Pozo

- Cubierta para balsa de digester UP BIOGAS  
Tejido específico para biogás con Sellamiento perimetral y válvulas de presión.



Figura 23 Cubierta Cámara de digestión

- 2 Agitadores horizontales WILO-EMU TRE 90-2.20 4x
  - Hélice de 2 o 3 palas
  - Diámetro de la hélice: 90 cm
  - Potencia: 4.5 kW
  - Motor sumergible con acoplamiento a eje vertical



Figura 24 Agitador Horizontal

### Instalación de Gas

- 3 Filtros de biogás IG Biogás
  - Filtros de ácido sulfhídrico
  - Con trampa de agua



Figura 25 Filtros de Biogás

- 2 depósitos de almacenaje LAPESA LP19 y LP16
  - Capacidad: 19 y 16 m<sup>3</sup> respectivamente
  - Dimensiones:  $\phi 1.5 \times 9.5$  m y  $\phi 1.5 \times 11.25$  m

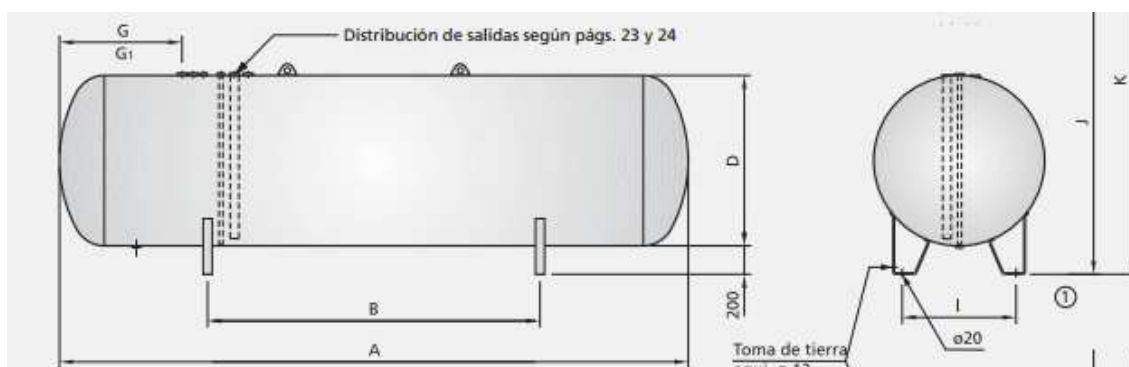


Figura 26 Deposito de almacenamiento de Biogás



- Quemador de antorcha Emison A-25  
Dimensiones:  $\varnothing 0.6 \times 3$  m



Figura 27 Quemador de antorcha

- Compresor con soplante RC 7.5A  
Caudal: 1 m<sup>3</sup>/min  
Presión de descarga: 10 bar  
Potencia: 6 kW



Figura 28 Compresor con Soplante

### Instalación Térmica

- Bombas de recirculación EVOPLUS B  
120/250.4 M  
Caudal máx.: 4 m<sup>3</sup>/h  
Presión máxima: 12 m.c.a  
Potencia: 0.4 kW



Figura 29 Bomba recirculadora

- Tubería PEX 16x2 mm

## 4. Estudio Económico

En este apartado se va a llevar a cabo un análisis de la rentabilidad económica de la instalación. Se analizarán los costes estimados de la instalación con la realización de un presupuesto aproximado, además se calculará el coste eléctrico con y sin la instalación para poder obtener el ahorro económico que supone implantar esta instalación. Como se comentó en apartados anteriores el beneficio económico asociado a la venta del efluente no se tendrá en cuenta ya que la venta de este se producirá con y sin la instalación.

### 4.1 cálculo de Gasto eléctrico

Para calcular el coste económico que supone el consumo de electricidad de la EDAR será necesario saber cuántos kilowatios hora se consumen a diario y de manera anual en la estación depuradora, una vez sean conocidos solo quedará multiplicar por el precio de la tarifa eléctrica. Estos datos de consumo eléctrico fueron estimados en apartados anteriores:

$$C_t = 3278.52 \text{ kWh/día}$$

$$C_a = 1196659.8 \text{ kWh/año}$$

Una vez que tenemos los valores multiplicamos por el precio de la tarifa eléctrica que en este caso se ha seleccionado una tarifa de:

$$\text{Precio} = 0.134615 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

El gasto diario de energía es de:

$$G_d = 3278.52 * 0.134615 = 441.34\text{€}$$

El gasto anual de energía es de:

$$G_a = 1196659.8 * 0.134615 = 161088.36\text{€}$$

Estos gastos han sido calculados para una situación en la que la instalación diseñada no esté en funcionamiento, como sucede en la actualidad. A continuación se calculará el gasto eléctrico total diario y anual incluyendo el consumo eléctrico adicional de los equipos de la instalación de digestión, que se sumaran a los consumos existentes en la actualidad.

Para calcular el consumo extra se ha desarrollado la siguiente tabla en la que se resumen los equipos de mayor importancia de la instalación y las horas de funcionamiento diarias (aprox.), de esta manera se obtienen los kWh diarios que se consumen de manera adicional.

	Potencia kW	tiempo (h)	kWh
bomba agua	0,75	2	1,5
bomba pozo	1,5	2	3
agitadores	9	12	108
bomba circulación	0,8	24	19,2
compresor	6	3	18
<b>TOTAL</b>			<b>149,7</b>

Tabla 10 Consumos energéticos instalación Biogás

Se consumen 149.7 kWh extras de manera diaria que sumado a la cantidad de consumo anterior resultara un consumo de:

$$Ct = 3428.22 \text{ kWh/dia}$$

$$Ca = 1251300.3 \text{ kWh/año}$$

Al multiplicar por la tarifa eléctrica se obtiene un gasto diario de:

$$Gd = 3428.22 * 0.134615 = 461.49€$$

El gasto anual de energía es de:

$$Gd = 1251300.3 * 0.134615 = 168443.79€$$

Por otra parte para calcular el ahorro diario y anual que conlleva la instalación del equipo de digestión se multiplica las horas de funcionamiento diarias por la energía eléctrica que genera, de esta manera se obtiene el

consumo energético que se ahorra y al multiplicar por la tarifa, el dinero que se ahorra en electricidad.

El motor tiene una potencia de 45 kW y funciona durante 21.93 horas diarias, por lo que la cantidad de energía eléctrica producida diariamente será de:

$$Ed = 45 * 21.93 = 986.85 kWh \text{ (Energía diaria generada)}$$

$$Ea = 98685 * 365 = 360200.25 kWh \text{ (Energía anual generada)}$$

Toda esta energía que se genera supone un ahorro económico anual de:

$$Ah = 360200,25 * 0,134615 = 48488,35 \text{ €}$$

Haciendo un resumen de los cálculos realizados se concluye que la EDAR de Barbastro gasta anualmente sin digestor una cantidad de 161088,36€, al instalar el sistema de digestión y cogeneración el consumo aumenta en 7220,8€, sin embargo se produce una cantidad de energía con un valor de 48488,35€. Así pues podemos concluir que el ahorro neto anual de energía es de:

$$Ahn = 41132,93 \text{ €}$$

## **4.2 Coste de las instalaciones y presupuesto**

A continuación se van a exponer una serie de presupuestos de los costes estimados de la construcción del digestor, así como de los equipos necesarios para su funcionamiento.

Los presupuestos están divididos en dos bloques principales. El primero es el referido a los costes de edificación del depósito de digestión y los de carga y descarga en este bloque también se incluyen los costes de instalación de la cubierta del digestor, los aislamientos y los movimientos de tierras necesarios. El segundo bloque incluye los costes de los equipos necesarios para el funcionamiento del digestor.

Es necesario tener en cuenta la diferencia entre el PEC y PEM. El primero (Presupuesto ejecución por contrata) incluye una serie de gastos (seguros, permisos, tramites...) y porcentajes de beneficio industriales, mientras que el segundo (Presupuesto ejecución material) es el valor únicamente de los materiales o equipos. Al final de los dos bloques se realizara un resumen y se especificara el importe total de las instalaciones.

Una vez se haya desarrollado el presupuesto quedara comprobar la viabilidad de estas instalaciones mediante el empleo de una serie de indicadores que se detallaran en el siguiente apartado.

## PRESUPUESTOS

### 1. EDIFICACION

#### 1.1 Movimiento de tierras

actividad	precio ud	cantidad	precio (€)
limpieza del terreno (m2)	1,16	236,7	274,57
excavación terreno(m3)	12,63	978,45	12.357,82
nivelado y compactación (m2)	1,17	236,7	276,94
transporte de tierras(m3)	5,29	978,45	5.176,00
<b>TOTAL PEM</b>			<b>18.085,34 €</b>
13% montaje, mano de obra, gastos adm.			2.351,09 €
6% beneficio industrial			1.085,12 €
<b>TOTAL PEC</b>			<b>21.521,55 €</b>

#### 1.2 Estructura

elemento	precio ud	cantidad	precio (€)
muro de hormigón armado HA 40cm (m2)	141,37	155,32	21.957,59
Losa hormigón armado HA 40cm (m2)	128,15	128,15	16.422,42
cimentación hormigón armado HA 100x40 (m2)	128,15	80,42	10.305,82
capa de grava 20 cm (m3)	16,00	24,152	386,43
muro hormigón armado HA 30 cm (m2)	106,03	70	7.422,10
losa hormigón armado HA 30cm (m2)	96,11	24	2.306,64
pasarela hormigón armado HA 30cm (m2)	96,11	18,54	1.781,88
pilar hormigón armado HA diámetro 80mm (m3)	88,36	8,04	710,41
<b>TOTAL PEM</b>			<b>61.293,30 €</b>
13% montaje, mano de obra, gastos adm.			7.968,13 €
6% beneficio industrial			3.677,60 €

**TOTAL PEC** **72.939,03 €**

### 1.3 elementos constructivos del digestor

material	precio ud	cantidad	precio (€)
aislante térmico poliuretano expandido 4cm (m2)	13,60	275,3	3.744,08
Chapa trapezoidal 6000/1000/1 mm.	6,07	14	84,98
cubierta tensada para balsas de digestión + instalación (m2)	224,56	130	29.192,80

TOTAL PEM 33.021,86 €

13% montaje, mano de obra, gastos adm. 4.292,84 €

6% beneficio industrial 1.981,31 €

**TOTAL PEC** **39.296,01 €**

### 1.4 herramientas y maquinaria

material	precio ud	cantidad	precio (€)
bomba de hormigón (h)	91,20	18	1.641,60
grúa de montaje (h)	42,20	56	2.363,20

TOTAL PEM 4.004,80 €

13% montaje, mano de obra, gastos adm. 520,62 €

6% beneficio industrial 240,29 €

**TOTAL PEC** **4.765,71 €**

**TOTAL EDIFICACION** **138.522,30 €**

## INSTALACIONES Y EQUIPOS

### 2.1 Equipos

equipo	precio ud	cantidad	precio (€)
Bomba centrífuga SACI HK 25 M	313,63	1	313,63
Bombas de Pozo CALPEDA GMC 50 BE	1211,56	2	2.423,12
Agitadores horizontales WILO-EMU TRE 90-2.20 4x	2400,00	2	4.800,00
Filtros de biogás IG Biogás	2909,70	1	2.909,70
Depósito de almacenaje LAPESA LP19	11480,00	1	11.480,00
Depósito de almacenaje LAPESA LP16	9800,00	1	9.800,00
Quemador de antorcha A-25	13700,00	1	13.700,00
Compresor con soplante RC 7.5A	2260,67	1	2.260,67
Bombas de recirculación EVOPLUS B 120/250.4 M	135,30	2	270,60
Tubería Pex (m)	2,25	1200	2.700,00
Motores CHP OEKO 45 BG	45200,00	2	90.400,00
<b>TOTAL PEM</b>			<b>141.057,72 €</b>
13% montaje, mano de obra, gastos adm.			18.337,50 €
6% beneficio industrial			8.463,46 €
<b>TOTAL PEC</b>			<b>167.858,69 €</b>
<b>RESUMEN PRESUPUESTO</b>			
Total Edificación			138.522,30 €
Total equipos			167.858,69 €
<b>TOTAL INSTALACION</b>			<b><u>306.380,99 €</u></b>



### 4.3 análisis de la Rentabilidad

Calculados ya todos los costes así como los beneficios que se obtienen de la instalación, en este caso la energía anual que se ahorra, es necesario saber si el proyecto es económicamente rentable. Para comprobar la viabilidad de esta instalación se pueden calcular una serie de indicadores o variables ayudarán a saber si económicamente tiene sentido y en cuanto tiempo podría estar amortizada la instalación. En función del análisis de estos indicadores se podría tomar una decisión favorable o desfavorable para su instalación.

Los principales indicadores que se van a calcular son los siguientes:

- Tasa de recuperación(TR) se define como:

$$TR = \frac{An}{CI} * 100$$

Donde An es el ahorro anual neto y CI el capital invertido. Básicamente indica el porcentaje de inversión que se recupera cada año. Observar que el numerador, ganancia anual neta (An) puede referirse tanto a los ingresos, como a ahorros conseguidos. En caso de que los ahorros anuales no sean constantes, el método no tiene en cuenta la rapidez con la que se recupera la inversión.

Una vez definido se calcula aplicando la formula, teniendo en cuenta los datos de este estudio

$$An = 41132.93\text{€}$$

$$CI = 306380,99\text{€}$$

$$TR = \frac{41132.93}{306380,99} * 100 = 13,42\%$$

- Payback o Periodo de retorno:

Por periodo de retorno o payback se entiende el tiempo necesario para que el total de ingresos o ahorros netos obtenidos con el

proyecto sean iguales al capital invertido. Para realizar el cálculo del payback se divide el coste total de la inversión inicial por el ahorro neto anual.

$$Payback = \frac{CI}{An}$$

$$Payback = \frac{306380,99}{41,132,93} = 7,44 \text{ años}$$

Otra variable que puede ser analizada es el Valor actual neto, aunque su importancia es menor proporciona una idea de cuál es el valor del proyecto en cada momento. Se va a calcular el van para un periodo de diez años y se observará cual es su evolución.

- VAN (valor actual neto):

El método consiste en calcular el valor actual de todas las inversiones anuales y los ahorros netos a lo largo de la vida del proyecto. Sumando todos los valores actuales durante un cierto periodo se obtiene un cierto valor, al que se llama VAN y se trata del valor de ese proyecto en dicho momento.

Para su cálculo es necesario hacer un diagrama de flujos en el que se introduzcan los datos de los beneficios y los costes generados cada año, así como el interés, en caso de haber solicitado un préstamo. En el caso del estudio no se ha tenido en cuenta los posibles intereses y se ha calculado el VAN durante un periodo de 10 años.

año	flujo (€)	VAN (€)
0	-306380,99	-306380,99
1	41132,93	-265248,06
2	41132,93	-224115,13
3	41132,93	-182982,2
4	41132,93	-141849,27
5	41132,93	-100716,34
6	41132,93	-59583,41
7	41132,93	-18450,48
8	41132,93	22682,45
9	41132,93	63815,38
10	41132,93	104948,31

Tabla 11 Flujos de Caja de la amortización del Proyecto

Hay que observar que entre los flujos de caja se incluyen las inversiones (con signo negativo) y los ahorros (signo positivo), de tal forma que si el VAN es negativo, el proyecto no va a ser rentable nunca. Si el VAN es positivo, el proyecto puede ser aceptable. En este caso se puede observar que el VAN es negativo los primeros 7 años a partir de aquí el valor actual neto de la instalación comienza a ser positivo. Esto coincide con la anterior variable calculada el payback que estimaba el periodo de recuperación de la inversión en 7 años.

Otro aspecto que se ha estudiado es que pasaría si modificara el valor de la tarifa de la luz, ya que es bastante probable que durante el transcurso de la vida útil del proyecto el precio de esta tarifa varíe. Para analizar esta variación, se ha hecho una tabla de cómo se modificaría la rentabilidad de la instalación en caso de que la tarifa de la luz cambiara. Actualmente y para la realización de los calculo de rentabilidad normales, se ha seleccionado una tarifa de un valor medio de  $0.134615 \text{ €/kWh}$  (*tarifa 1*), pero como es posible que esta cambie a lo largo de la vida útil del proyecto se ha analizado la rentabilidad de la instalación con una tarifa eléctrica más favorable considerando esta tarifa igual a la que existe actualmente en horas punta, con un valor de  $0.170122 \text{ €/kWh}$  (*tarifa 2*).

Obviamente que aumente el valor de la electricidad reducirá el payback de la instalación, ya que aunque el gasto de electricidad en euros se mayor, también lo será el ahorro neto anual. En el siguiente grafico se puede observar cómo se modifica el payback en función de la tarifa 1 o la tarifa 2:

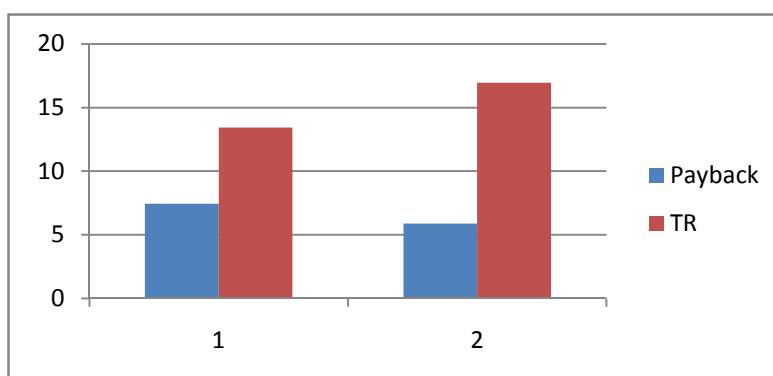


Gráfico 2 Variación del Payback y la TR con distintas Tarifas

De este grafico se puede extraer la conclusión de cuanto mayor sea el precio de la electricidad y una vez realizada la inversión, menor será el payback y mayor la rentabilidad, ya que el ahorro neto anual también será mayor.

Analizando estas variables económicas se puede observar que la rentabilidad de esta instalación desde un punto de vista económico no es muy elevada. En este caso el periodo de retorno de 7 años resulta bastante elevado y la tasa de recuperación es de apenas un 13% algo baja para una instalación con tanta inversión inicial. Se puede decir pues que esta instalación podría resultar rentable a largo plazo, o en un plazo más corto si se disminuyeran los costes de inversión mediante algún tipo de subvención. Sin embargo es muy difícil que se pueda llevar a cabo debido a que es necesario un capital inicial muy elevado además de unos equipos muy específicos que precisan de mucho mantenimiento.

## **5. Conclusiones**

Los objetivos de este estudio eran por un lado realizar una valorización energética de los fangos de la estación depuradora analizando las distintas opciones existentes como la incineración, la digestión, la descarga a vertedero o la venta como sustrato. Por otra parte el segundo objetivo era la realización de un estudio tanto a nivel técnico como económico y el pre-dimensionado de un digestor anaerobio para su posible instalación.

Desde el punto de vista técnico se trata de una instalación muy compleja, debido principalmente a sus grandes dimensiones y a la gran cantidad de equipamiento específico necesario, este equipo precisa de mucho mantenimiento y control. También debido a las muchas variables distintas que afectan al proceso, ya que cualquier modificación de una de ellas afecta al resto. No hay que olvidar que este estudio ha sido realizado a través de una serie de valores estimados, que proporcionan un valor aproximado de las variables de funcionamiento en unas condiciones óptimas. Si este proyecto se quisiera llevar a cabo sería necesario realizar una serie de estudios más

profundos acerca de la composición química del efluente, para saber la cantidad de biogás que es capaz de generar. También sería preciso realizar un análisis de la composición de este biogás para poder obtener su poder calorífico de una forma precisa. Por último sería necesario hacer un estudio mucho más exhaustivo de las instalaciones y equipos concretos necesarios para el procesamiento del biogás, ya que en este estudio únicamente se incluyen los elementos más importantes de la instalación.

Desde el punto de vista económico es una instalación que conlleva un gran desembolso inicial, principalmente debido a que este tipo de instalaciones tienen que ser construidas a medida y en función de las características concretas de cada caso, lo que encarece los costes. Los costes de inversión son principalmente debidos a dos bloques el bloque de edificación, que incluye los gastos de construcción de todas las instalaciones, y el bloque de equipos e instalaciones, que incluye todos los equipos necesarios para poder procesar el biogás.

Como se ha comentado anteriormente se trata de una instalación de grandes dimensiones y que tiene que ser construida a medida y en función de las necesidades de la estación depuradora que actualmente se encuentra en funcionamiento, lo que supone un gasto muy significativo. Por otra parte al tratarse de equipos específicos y de una tecnología más o menos elevada, se precisara de un mantenimiento y control constante, lo que aumentara su coste.

Si se analizan los parámetros obtenidos en el apartado anterior se puede ver que el proyecto podría resultar rentable a largo plazo, tal y como está planteado, a partir de los 7 años de su puesta en funcionamiento. Sin embargo es difícil que esta instalación tal y como está planteada en el estudio pueda llevarse a cabo, ya que muchas empresas consideran un proyecto rentable aquel que tiene un *payback* no superior a 3 años y en este caso aparte de superarlo, se trata de una instalación muy compleja a nivel técnico.

Por otra parte se podrían plantear una serie de alternativas para intentar que aumentara su rentabilidad. Una de las posibles alternativas sería reducir

los costes de inversión mediante algún tipo de subvención si existiera alguna para este tipo de instalaciones. Otra posible alternativa sería aumentar el volumen de producción procesando fangos de granjas de los alrededores o incluso creando una planta de digestión que utilizara fangos de varias localidades.

En conclusión este estudio muestra que la valorización energética de los fangos generados en estaciones depuradoras mediante los procesos de digestión anaerobia es muy positiva. Desde el punto de vista energético permite la recuperación de una energía que de otra manera se perdería. Desde el punto de vista ecológico y ambiental proporciona un efluente estable muy rico en nitrógeno que puede ser utilizado como enmienda orgánica del suelo además de eliminar los posibles contaminantes. Sin embargo desde el punto de vista económico en este caso resulta poco rentable o rentable a largo plazo.

Por ello se puede decir que el proceso de digestión anaerobia será mucho más rentable en ciudades de tamaño medio-alto (con volúmenes de fangos generados mayores), que en Barbastro una localidad de tamaño medio-bajo con aun población de 17300 habitantes que genera menos cantidad de fangos.

## 6. Bibliografía y Software

### Libros

1. Sebastián Nogues, Fernando García, Daniel Rezeau “Energía de la Biomasa Volumen I” Pressas Universitarias de Zaragoza. 2010 ISBN978-84-92774-91-3
2. Sebastián Nogues, Fernando García, Daniel Rezeau “Energía de la Biomasa Volumen II” Pressas Universitarias de Zaragoza. 2010 ISBN 978-84-15031-01-7
3. Apuntes de la Asignatura “Tecnología Energética y Optimización” 2007.
4. Seoanez Calvo, Mariano “Ingeniería del Medio ambiente” Mundi-Prensa 2005.
5. Seoanez Calvo, Mariano “Aguas Residuales: tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento” Mundi-Prensa 1995.
6. Apuntes Máster energías Renovables curso 2011/2012

### Estudios Técnicos

1. Pdf Ponencias 7ª jornadas Técnicas de Saneamiento y depuración “Del análisis del biogás a la planta de cogeneración” Esamur 2011.
2. Antonio Talavera Aroca “Estudio técnico – económico de implantación de un sistema de cogeneración con biogás en una explotación agropecuaria” Universidad Pontificia de Madrid 2010.

### Catálogos Online

1. [www.bombas-saci.com](http://www.bombas-saci.com)
2. [www.lapesa.net](http://www.lapesa.net)
3. <http://www.ynstalia.com/productos/TUBERIA%20PEX%20Y%20MULTICAPA%20CONEXION%20RAPIDA.pdf>
4. <http://www.gruponovaenergia.com/pdf/ficha-tecnica-cogeneracion-biogas-oeko-45.pdf>
5. <http://www.upbiogas.es/pdf/pdf-upbiogas-complementos.pdf>

### **Software**

1. *Programa de Cálculo de ecuaciones EES*
2. *Microsoft Office Excel*
3. *Microsoft Office Word*

### **Páginas Web**

1. [www.wikipedia.es](http://www.wikipedia.es) artículo de depuración de aguas
2. <http://www.boa.aragon.es/cgi-bin/EBOA/BRSCGI?CMD=VEROBJ&MLKOB=51382074830>
3. [http://www.aragon.es/DepartamentosOrganismosPublicos/Organismos/InstitutoAragonésAgua/ÁreasTemáticas/DepuraciónAguasResiduales/MAPA/Depuradoras/Huesca/ci.17\\_Barbastro.detalleDepartamento?channelSelected=0](http://www.aragon.es/DepartamentosOrganismosPublicos/Organismos/InstitutoAragonésAgua/ÁreasTemáticas/DepuraciónAguasResiduales/MAPA/Depuradoras/Huesca/ci.17_Barbastro.detalleDepartamento?channelSelected=0)
4. <http://www.gruponovaenergia.com/productos/cogeneracion-biogas.php>
5. [http://www.ruralcat.net/c/document\\_library/get\\_file?uuid=a47bec7f-62bf-46d5-93a2-6359e71cda1b&groupId=10136](http://www.ruralcat.net/c/document_library/get_file?uuid=a47bec7f-62bf-46d5-93a2-6359e71cda1b&groupId=10136)
6. [www.esamur.es](http://www.esamur.es)
7. [www.aqualimpia.com](http://www.aqualimpia.com)
8. [www.bombas-saci.com](http://www.bombas-saci.com)
9. [www.lapesa.net](http://www.lapesa.net)
10. [www.garciaruiz.es](http://www.garciaruiz.es)
11. [www.gruponovaenergia.com](http://www.gruponovaenergia.com)
12. [www.upbiogas.es](http://www.upbiogas.es)
13. [www.calpedaiberica.com](http://www.calpedaiberica.com)
14. [www.emison.com](http://www.emison.com)
15. [www.hierrosextebarria.com](http://www.hierrosextebarria.com)
16. [www.idae.es](http://www.idae.es)