



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Ambiental

**Digestión Anaerobia En Vía Seca – Diseño De Tratamiento de
Fangos Generados en Estación Depuradora De Aguas
Residuales**

Autor:

Ing. Agr. Mendoza Pacheco César Antonio

Tutor:

Pedro García Encina

**Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio
Ambiente**

Valladolid, Julio de 2015

DIGESTIÓN ANAEROBIA EN VÍA SECA – DISEÑO DE TRATAMIENTO EN FANGOS
GENERADOS EN ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES

Índice de contenidos

| | |
|---|----|
| Resumen | 1 |
| Abstract | 1 |
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Antecedentes y justificación..... | 3 |
| 2.1 Antecedentes | 3 |
| 2.2 Justificación..... | 4 |
| 3. Objetivos | 5 |
| 3.1 Objetivo General | 5 |
| 3.2 Objetivos específicos..... | 5 |
| 4. Digestión anaerobia..... | 6 |
| 4.1 Etapas de la digestión anaerobia | 6 |
| 4.2 Parámetros del proceso..... | 9 |
| 4.2.1 Temperatura | 9 |
| 4.2.2 Tiempo de retención (TR)..... | 10 |
| 4.2.3 Velocidad de Carga Orgánica (OLR)..... | 11 |
| 4.2.4 Nivel de pH | 11 |
| 4.2.5 Proporción Carbono a Nitrógeno (C/N) | 12 |
| 4.2.6 Rendimiento de Metano (CH ₄) | 12 |
| 4.3 Tipos de tecnologías en digestión anaerobia | 13 |
| 5. Tratamiento de Fangos de EDAR | 14 |
| 5.5 Digestión anaerobia en vía seca para el tratamiento de fangos de EDAR | 16 |
| 5.5.1 Diferentes sistemas de digestión anaerobia en vía seca | 16 |
| 5.5.2 Importancia del Sistema seleccionado | 17 |
| 5.5.3 Descripción del Sistema Valorga | 18 |
| 5.5.4 Obtención de inóculo | 21 |

| | |
|--|----|
| 6. Dimensionamiento de un Sistema de Digestión Anaerobia en Vía Seca para el tratamiento de fangos de EDAR | 21 |
| 6.1 Descripción de aguas residuales recibidas en EDAR..... | 21 |
| 6.2 Descripción de los fangos | 22 |
| 6.2.1 Balance de masa de fangos..... | 22 |
| 6.3 Calculo de volumen y dimensiones de las herramientas de tratamiento | 23 |
| 6.3.1 Espesamiento de fangos | 23 |
| 6.3.2 Deshidratación..... | 25 |
| 6.3.3 Digestor Anaerobio – VALORGA..... | 25 |
| 7. Aprovechamiento de productos de la Digestión..... | 29 |
| 7.1 Factores económicos y energéticos asociados con el proceso de digestión anaerobia en vía seca..... | 30 |
| 7.2 Producción de biogás | 30 |
| 7.3 Aprovechamiento y rendimiento de energético..... | 32 |
| 7.4 Utilización de fangos depurados en la agricultura | 34 |
| 8. Impacto ambiental de la técnica empleada..... | 35 |
| 8.1 Emisión de Gases de Efecto Invernadero..... | 35 |
| 8.2 Metales pesados | 36 |
| 8.3 Uso del sólido bioestabilizado en la agricultura..... | 36 |
| 9. Conclusiones | 38 |
| 10. Recomendaciones..... | 39 |
| 11. Bibliografía | 40 |
| ANEXOS..... | 43 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Sistemas de Digestión en vía seca..... | 17 |
| Tabla 2. Parámetros de operación del Sistema Valorga..... | 20 |
| Tabla 3. Caracterización de aguas residuales de la EDAR | 21 |
| Tabla 4. Descripción de las condiciones de los lodos a depurar | 22 |
| Tabla 5. Parámetros de diseño de dos espesadores para fangos primarios | 24 |
| Tabla 6. Parámetros de diseño del digestor..... | 26 |
| Tabla 7. Cálculo de potencia disipada en reactor..... | 27 |
| Tabla 8. Generación de biogás | 32 |
| Tabla 9. Valores utilizados para obtener rendimiento energético | 32 |
| Tabla 10. Rendimiento energético mensual | 33 |
| Tabla 11. Consumo energético de EDAR | 33 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Fases de la Digestión Anaerobia..... | 9 |
| Figura 2. Tecnologías disponibles en Digestión Anaerobia en vía seca | 14 |
| Figura 3. Línea de fangos – Convencional..... | 15 |
| Figura 4. Digestor del proceso VALORGA..... | 19 |
| Figura 5. Funcionamiento de Digestor Anaerobio VALORGA..... | 28 |
| Figura 6. Esquema de planta de tratamiento de fangos | 29 |

Resumen

La producción de lodos es inherente al tratamiento de las aguas residuales y es considerado un residuo, por consiguiente se requiere del tratamiento adecuado conforme a la jerarquía de residuos que supone el reciclaje, como lo es la aplicación como acondicionador de suelos agrícolas. Actualmente en Europa el tratamiento convencional de lodos de EDAR requiere de altos costos y operaciones complejas debido al gran volumen depurado. En el presente trabajo se estudia la alternativa de Digestión Anaerobia en Vía Seca – Sistema VALORGA, que trabaja con alta carga orgánica y proporción de ST, permitiendo disminuir el volumen de reactor y aumentar el rendimiento de biogás por kilo de sólidos degradados. Se diseña una planta de tratamiento alimentada por 302948 m³ al mes con 2.22 kg SV/m³ de fangos primarios y 179160 m³ con 3.43 kg/m³ de secundarios por mes, consta de tres espesadores, 3 centrífugas para deshidratación y 2 reactores con volumen unitario de 1173 m³ donde se ejecuta la digestión. Se obtienen 11950 m³ de biogás que generan aproximadamente 2306 MWh al mes y 391 toneladas de biosólidos ricos en nitrógeno y fósforo y con bajo nivel de patogenicidad, éstos son destinados al uso en la agricultura para emplearlos como mejoradores de suelo.

Abstract

The production of sludge is inherent at treatment of the wastewater and it is considerate as a residue, therefore it requires the right treatment according to the waste hierarchy representing recycling, such as application for improvers of ground. Currently in Europe the conventional treatment of sewage sludge require high cost and complex operations due treatment of great volume. In this paper the alternative Dry Anaerobic Digestion - Valorga system is studied, which works with high, organic load rate and proportion of TS, allowing the reactor volume decrease and increase the performance of biogas per kilo solid degraded. The treatment plant is feed by 302948 m³ monthly with 2.22 kg VS/m³ primary sludge and 179160 m³ with 3.43 kg/m³ of secondary sludge by month. It has three thickeners, three dehydrators and two reactors with 1173 m³ for digestion work. 11950 m³ of biogas generated about 2306 kWh per month are obtained. Further, 391 ton are obtained of solid, rich in nitrogen and phosphorous with low pathogenic level, it are destined at agricultural use as improvers of soil.

1. Introducción

La situación mundial actual presenta retos sin precedentes debido al crecimiento desmesurado de la dependencia de importaciones y escasez de recursos, sumándole a esto, la necesidad de limitar el cambio climático y el deterioro del medio ambiente. Por lo tanto, el uso eficiente de los recursos y la restitución del consumo de éstos son alternativas a considerar.

Grandes volúmenes de aguas residuales son producidos diariamente, por lo que el tratamiento de este recurso es indispensable para no perjudicar la biodiversidad del ecosistema y restaurar, en cierta medida, el buen estado de las mismas (Frerot, 2009).

Este tratamiento genera unos fangos, que son considerados residuos sólidos, por lo tanto, para proteger el medio ambiente, la salud humana y disminuir el impacto global del uso de recursos deben ser estabilizados y reciclados (MARM, 2009).

El proceso completo que incluye el tratamiento del agua residual y la estabilización de los fangos generados requiere de energía, siendo el tratamiento secundario (biológico) el responsable de un 55 % que consume aproximadamente 1.1 – 2.4 MJ/m³ (Gikas & Tsoutsos, 2012).

Entre los tratamientos biológicos empleados, la Digestión Anaerobia es el más rentable y eficiente debido a que recupera energía en el proceso y su impacto ambiental es reducido (Kothari *et al*, 2014).

La Digestión Anaerobia es un proceso biológico en que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en producto gaseoso o “Biogás” (IDAE, 2007).

El biogás es una mezcla de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y otros gases traza, que puede ser usado para:

- En pequeña escala se usa para cocinar o iluminación de viviendas
- Generación de electricidad y calor
- Combustible para vehículos
- Alimentación en las redes de gas natural

(United Kingdom The Parliamentary Office of Science and Technology, 2007)

En la Unión Europea, la Directiva 2012/27/UE de Octubre de 2012, fomenta el aumento de la eficiencia energética mediante un marco común de medidas que apuntan al ahorro del 20 % para el año 2020, por lo tanto es necesario poner en marcha procesos que generen energía renovable (Unión Europea, 2012).

Además, la implantación de sistemas de producción de biogás de digestión se podrían centralizar por zonas geográficas, con mayores beneficios socioeconómicos y ambientales (IDAE, 2007).

El presente trabajo pretende demostrar la posibilidad de trabajar con procesos de digestión anaerobia mediante tecnologías capaces de estabilizar altas concentraciones de sólidos, la alternativa presentada es el tratamiento en vía seca. Kothari *et al* (2014) categorizan opciones de tratamiento de acuerdo al porcentaje de sólidos en el digestor, y plantean que la vía seca es capaz de trabajar a porcentajes de 20 a 40 % de sólidos totales.

Diferentes tipos de biomasa pueden ser empleados como sustrato, dentro de los cuales se incluyen los residuos orgánicos; ya sean agroindustriales, municipales o lodos de depuradora; siempre que contengan los nutrientes necesarios para los procesos metabólicos (Kusch *et al*, 2011).

El estudio contempla una indagación sobre las definiciones y fundamentos necesarios para el dimensionamiento de un tratamiento de digestión anaerobia en vía seca, con el fin de realizar un diseño del proceso mencionado.

2. Antecedentes y justificación

2.1 Antecedentes

Es evidente que la depuración de aguas residuales es necesaria para tener agua de calidad. Sin embargo, los costos energéticos en las líneas de tratamiento son elevados y la legislación cada vez más rigurosa.

Por lo tanto, es necesario utilizar alternativas que disminuyan el impacto ambiental y el costo económico. La digestión anaerobia, que es una tecnología que permite la valorización energética de desechos generados en las EDAR, como son los fangos, mediante la conversión del material biodegradable a biogás.

Las primeras aplicaciones de la digestión anaerobia para la recogida de biogás fueron registradas en Reino Unido en el año 1897, y se usó para el alumbrado y la calefacción en los trabajos de tratamiento y fue hasta en 1927 que se separaron en cámaras de digestión y de sedimentación (Bermúdez, 1988).

En los últimos 20 años se ha comprobado que los costes de energía, en valores reales, disminuyeron debido al precio relativamente moderado del petróleo, esto conllevó a que el consumo energético global aumentara (Castells, 2012).

En 1997 la Unión Europea, bajo el marco de la política energética comunitaria, elaboró el Libro Blanco para una Estrategia Común y un Plan de Acción para las Energías Renovables, cuyo planteamiento consiste en que las energías renovables aporten el 12 % de la energía primaria demandada en el año 2010.

Es por tales causas que hasta finales del año 2003 el consumo de biogás en la Unión Europea, medido en términos de energía primaria, alcanzó más de 3 millones de tep (toneladas equivalentes de petróleo). En 2010 el objetivo establecido se dirige a aumentar la aportación por parte del biogás en 15 millones de tep (MINETUR, 2005).

En épocas más recientes la Directiva 2012/27/UE de Octubre de 2012, fomenta el aumento de la eficiencia energética mediante un marco común de medidas que apuntan al ahorro del 20 % para el año 2020 (Unión Europea, 2012).

Por consiguiente, se ha observado, que en el desarrollo de la búsqueda por medidas de ahorro energético, la alternativa de empleo de biogás es la más amigable con el ambiente

y, por ser una fuente renovable, brinda seguridad para el futuro del desarrollo socioeconómico.

El avance tecnológico ha permitido estudiar más a fondo el medio en que se desarrollan este tipo de procesos, es por ello que seleccionando condiciones óptimas de operación y asegurando un aporte adecuado de nutrientes es posible conseguir los mejores rendimientos para un aprovechamiento más eficiente de los sistemas de tratamiento.

De esta manera, surge un tipo de digestión anaerobia que trabaja con altas proporciones de sólidos, la vía seca de tratamiento anaerobio de fangos. Este proceso es una alternativa novedosa y más popular en estos días entre investigadores y el sector corporativo a escala de laboratorio y para estudios piloto debido al costo reducido y a los coproductos potenciales.

2.2 Justificación

Se ha estimado que el 20 % de los gastos de energía de las municipalidades son para la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales (Gikas & Tsoutsos, 2012).

Por consiguiente, la optimización energética y la autosostenibilidad de las EDAR son ideas que deben plantearse y adicionalmente estudiar alternativas para lograr tal fin. Esto conlleva a buscar tecnologías que permitan revalorizar la energía contenida en la materia biodegradable que se está depurando.

Actualmente, se llevan a cabo procesos de digestión anaerobia, no obstante, los sistemas convencionales presentan ciertas limitantes, como son los bajos rendimiento de generación energética, altos costos de infraestructura de la planta y los grandes volúmenes con los que se trabaja que dificultan la operación.

Dentro del marco legal de la comunidad europea y a conciencia de las repercusiones ambientales que causan los residuos, líquidos y sólidos, no es lógico dejar de ejecutar los tratamientos respectivos, sino buscar alternativas que puedan solventar tales limitantes.

La digestión anaerobia en vía seca, es una técnica que da respuesta a la problemática actual de los sistemas convencionales ya que operando con altas proporciones de sólidos totales en el influente, el volumen del reactor y las complicaciones del transporte disminuyen.

Al mismo tiempo, los rendimientos de generación de energía se incrementan por la conversión de una mayor cantidad de materia orgánica. La energía obtenida, al ser derivada de la biomasa, es renovable y con emisiones de Gases de Efecto Invernadero consideradas nulas.

El presente documento pretende afianzar los conocimientos sobre la digestión anaerobia en vía seca y reflejar una comparación de la eficiencia de parámetros operacionales del proceso frente a los sistemas convencionales. Por lo que se plantean los siguientes objetivos.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

- Indagar y diseñar un proceso de tratamiento de digestión anaerobia en vía seca.

3.2 Objetivos específicos

- Indagar sobre las definiciones y fundamentos necesarios del proceso de digestión anaerobia en vía seca.
- Diseñar un proceso de tratamiento de digestión anaerobia en vía seca para el tratamiento de fangos de depuradora.
- Conocer los parámetros necesarios para obtener los mejores rendimientos de metano.

4. Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en productos gaseosos o biogás (IDAE, 2007). Cualquier materia que pueda ser fermentada contiene las bacterias que la digieren y obtienen como subproducto el biogás rico en metano (Avendaño, 2010).

Los tratamientos de digestión anaerobia de los desechos orgánicos aceleran la descomposición natural del material orgánico en ausencia de oxígeno, si la temperatura, el contenido de humedad y el pH se mantienen cercanos a los valores óptimos (IPCC, 2006).

Bajo las condiciones adecuadas, los microorganismos obtienen energía y crecen mediante la metabolización del material fermentado, y por ser de naturaleza anaerobia, funcionan mejor con ausencia de oxígeno convirtiendo el sustrato en biogás, cuya constitución principal es metano (55 – 75 %) y Dióxido de carbono (25 – 45 %). La cantidad de biometano depende del sustrato empleado. Este subproducto puede ser usado para la producción de calor, cogeneración de calor y energía (CHP) o para mejorarlo a gas natural o a calidad de combustible para el transporte (Reith *et al*, 2003).

Esta tecnología es una opción particularmente prometedora que aumenta el interés mundial, ya que no solo suministra un limpio y versátil portador de energía, sino también que a consecuencia de ello, desplaza otras fuentes de energía como lo son los combustibles fósiles, por lo que es adecuado para contribuir hacia un esquema de gestión apropiada en las áreas urbanas y agropecuarias (Kusch *et al*, 2011).

Las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en estos tipos de tratamiento, según El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (2006), IPCC por sus siglas en inglés, deben ser declarados en el sector energía por vincularse con la obtención de metano y la combustión energética.

4.1 Etapas de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia se caracteriza por la existencia de varias fases consecutivas, las cuales se diferencian en el proceso en el que el sustrato (el alimento de los

microorganismos) se va degradando, produciéndose en cadena los diferentes tipos de bacterias (Avendaño, 2010).

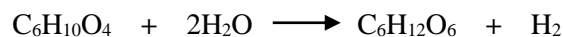
Este proceso lo ejecuta un consorcio de microorganismos como son, las bacterias acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas. Las cuales son responsables de la producción de biogás a partir de materiales orgánicos. Esta materia prima o sustrato se encuentra en muchos desechos en forma de polímeros como carbohidratos (celulosa, hemicelulosa, almidón, etc.), aceites, grasas y proteínas. En general, los microorganismos no son capaces de utilizar esos polímeros debido al gran tamaño de las moléculas, que no pueden penetrar la pared celular de los microbios, es por ello que se pueden diferenciar cuatro etapas principales (Kothari *et al*, 2014):

Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis.

En cada una de estas fases intervienen diferentes tipos de microorganismos, relacionados entre sí, pero que necesitan de distintas condiciones en el entorno.

Hidrólisis: Consiste en la conversión de biopolímeros no solubles a compuestos orgánicos solubles (Reith et al, 2003). En esta primera fase los compuestos orgánicos complejos se disocian en monómeros más sencillos, tales como azúcares, aminoácidos, ácidos grasos volátiles de bajo peso y alcoholes, con ayuda de enzimas extracelulares como celulasa, amilasa y otras enzimas proteolíticas. Así, se permite que las bacterias puedan asimilar la materia orgánica como fuente de nutrientes (Avendaño, 2010).

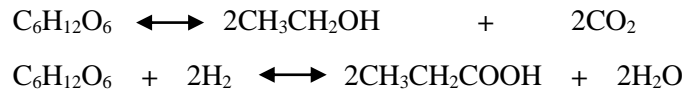
La reacción de la Hidrólisis se describe con la siguiente fórmula química (Kothari *et al*, 2014):



Acidogénesis: Conversión de compuestos orgánicos solubles a Ácidos Grasos Volátiles (AGV) y dióxido de carbono (Reith et al, 2003).

Los monómeros obtenidos en la fase anterior son degradados por bacterias acidogénicas para su crecimiento y acumulación a ácidos de cadena corta (de uno a cinco átomos de carbono en su estructura) como ácido acético, propiónico, butírico y valérico con dióxido de carbono, agua e hidrogeno (Avendaño, 2010).

Estas bacterias son de rápido crecimiento con un tiempo de duplicación sobre los 30 minutos. La fórmula química que ejemplifica tal proceso se muestra a continuación (Kothari *et al*, 2014):



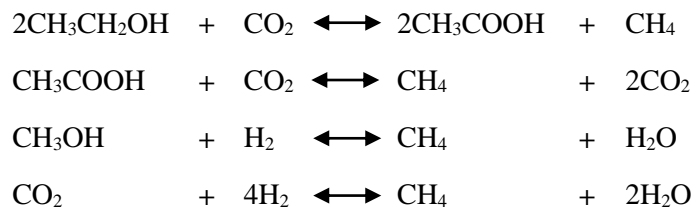
Acetogénesis: Conversión de AGV a Acetato e Hidrógeno (Reith *et al*, 2003). Los productos de la fase anterior, a excepción del ácido acético, sirven como sustrato para las bacterias que intervienen durante la acetogénesis, formándose ácido acético e hidrógeno, principalmente (Avendaño, 2010). El crecimiento de estos procariontes es lento con un tiempo de duplicación de 1.5 – 4 días, y se puede representar con la siguiente fórmula (Kothari *et al*, 2014):



Metanogénesis: Conversión de acetato, dióxido de carbono e hidrogeno a gas metano (Reith *et al*, 2003). Es decir, se completa la transformación comenzada en la etapa anterior, produciéndose alrededor del 70% al 90% del CH₄ total del proceso (Avendaño, 2010).

El metano es producido por un numero de sustancias simples: ácido acético, etanol, metanol, dióxido de carbono e hidrogeno.

El metano que se forma a partir del ácido acético es conocido como metanogénesis acetoclástica, mientras que el obtenido del hidrogeno y dióxido de carbono se conoce como metanogénesis hidrogenotrófica. Las bacterias metanogénicas también son de lento crecimiento, pues su tiempo de duplicación es de 2 – 4 días. Madigan *et al*, citado por Kothari *et al* (2014) encontró estequiométricamente que sobre el 70 % del metano producido proviene por la vía acetato. La reacción producida en la metanogénesis se presenta a continuación:



Para que proceda una digestión estable es de vital importancia que las diferentes conversiones biológicas permanezcan acopladas durante el proceso, y así prevenir la

acumulación de compuestos intermedios. Por ejemplo, si se acumulan los AGV el pH tiende a disminuir por lo que la metanogénesis, en tal condición no puede ocurrir como resultado del bajo pH. Por otro lado, si la presión del hidrogeno se convierte en alta, habrá menos formación de AGV, resultando en condiciones contrarias al escenario anterior.

En la figura 1 se muestra un esquema de los compuestos que intervienen en cada proceso de la digestión anaerobia.

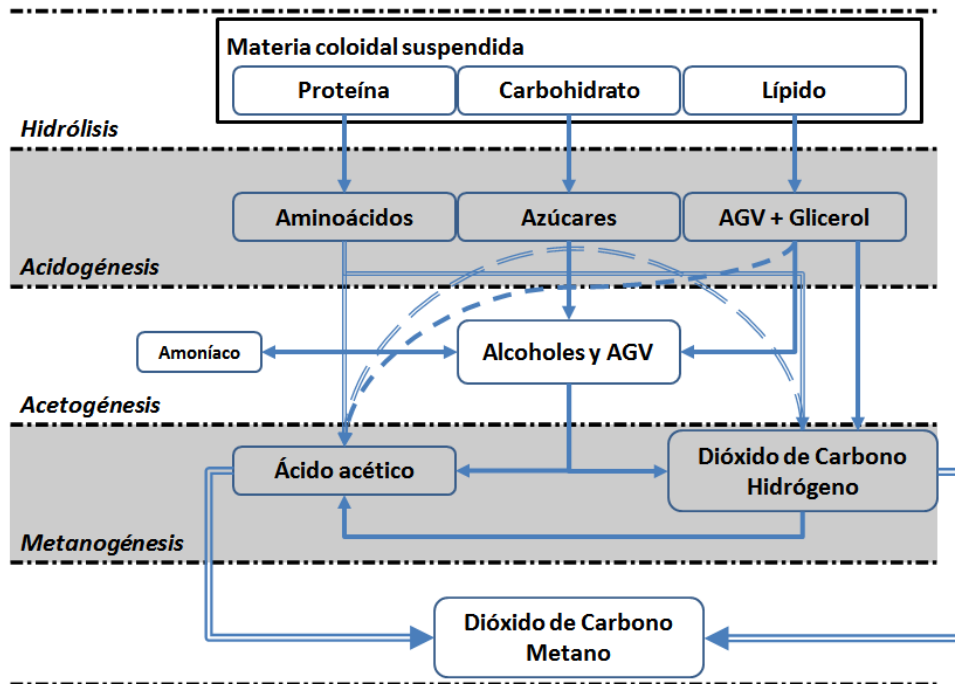


Figura 1. Fases de la Digestión Anaerobia

4.2 Parámetros del proceso

El producto de interés al momento de llevar a cabo un proceso de digestión anaerobia es el biogás, sin embargo existen un número de parámetros que influyen la formación del metano, como son: Temperatura, tipo de sustrato, nivel de pH, tiempo de retención, relación C/N, etc. La máxima producción se obtiene cuando estos parámetros se mantienen en los rangos óptimos (Khotari *et al*, 2014).

4.2.1 Temperatura

La temperatura determina la actividad que tendrán las bacterias presentes en el interior del digester: a mayor temperatura mayor será la actividad de las mismas y, por lo tanto, menor será el tiempo necesario que deba permanecer el sustrato en el digester.

El proceso de digestión anaerobia puede llevarse a cabo en un intervalo de temperaturas que abarca desde los 0° hasta 70° C aunque, en general, a temperaturas bajas ($\leq 15^{\circ}\text{C}$) el proceso de fermentación se ralentiza (Avendaño, 2010).

La regulación de temperatura es una técnica para mejorar la eficiencia del sistema y reducir el tiempo de retención en el proceso. Las temperaturas termofílicas convierten los ácidos orgánicos a proporciones más rápidas y con producciones de metano más altas que el sistema mesofílico. Además, mediante procesos termófilos se puede obtener un sustrato de alta calidad y libre de patógenos que sirva como acondicionador de suelos (Karthikeyan & Visvanathan, 2013).

Se ha encontrado que los digestores termofílicos tienen tiempos de retención inferiores, el cual es debido a la alta actividad catalítica de los microorganismos termófilos. Otro aspecto que es de gran importancia es que a las altas temperaturas que opera este sistema se obtiene un sólido estabilizado sin patógenos (Kothari *et al*, 2014).

4.2.2 Tiempo de retención (TR)

El tiempo de retención marca la duración del proceso de digestión anaerobia: la fracción de materia orgánica que se degrada aumenta conforme lo hace el tiempo que permanece en el interior del digester (Avendaño, 2010).

El tiempo de retención es definido como el tiempo requerido para completar la degradación de la materia orgánica o como el tiempo promedio en que ésta permanece en el digester. Y se obtiene mediante la expresión matemática siguiente:

$$1. \quad TR = \frac{V}{Q}$$

Donde;

TR: Tiempo de Retención (d)

V: Volumen del reactor (m^3)

Q: Caudal diario (m^3/d)

Este tiempo de retención varía de acuerdo al cambio de otros parámetros, como temperatura y composición del sustrato, para lograr completar todas las reacciones de la digestión anaerobia. Prueba de ello es que a temperatura mesofílica se requiere de 10 – 40 días para la digestión, mientras que en proceso termofílico tiende a ser menor, puesto que con altas cargas de sólidos, el rango está entre 14 días. El tiempo de retención es

directamente proporcional a la tasa de degradación; si ésta es baja, el TR aumenta (Kothari *et al*, 2014).

4.2.3 Velocidad de Carga Orgánica (OLR)

El IDAE (2007) define este parámetro como la cantidad de materia orgánica (DQO, DBO o SV) introducida al reactor por unidad de tiempo y volumen. Puede ser escrito mediante las dos expresiones siguientes:

$$2. \quad OLR = \frac{Q * S}{V} \qquad 3. \quad OLR = \frac{S}{TR}$$

Donde;

OLR: Velocidad de Carga Orgánica (kg/m³.d)

V: Volumen del reactor (m³)

Q: Caudal diario (m³/d)

S: Concentración de Sólidos Volátiles (mg/L ≈ kg/m³)

TR: Tiempo de Retención (d)

(Karthikeyan & Visvanathan, 2013)

La producción de biogás depende de este parámetro. Si la alimentación es superior a la adecuada, la producción de gas por unidad de materia orgánica se reduce, esto puede ser debido a la acumulación de sustancias inhibitoras, como son los AGV (Ácidos Grasos Volátiles), en el material en suspensión del digestor. Por lo tanto, en sistemas continuos es importante controlar correctamente la OLR (Khotari *et al*, 2014).

4.2.4 Nivel de pH

El valor del pH es una medición de la concentración de ácido en sistemas acuosos. Las bacterias anaerobias, especialmente las metanógenas, son sensibles a la concentración acida en el digestor y su crecimiento puede ser inhibido. Muchos investigadores han optimizado los valores de pH para cada estado de la digestión anaerobia (Kothari *et al*, 2014).

El proceso de digestión anaerobia requiere una neutralización para sustentar el crecimiento de poblaciones de bacterias metanogénicas y reducir el tiempo para completar esta fase y obtener una efectiva conversión de CH₄ (Karthikeyan & Visvanathan, 2013).

Los niveles más apropiados de pH están cercanos a la neutralidad y es importante tomar en cuenta que la acumulación de AGV produce una bajada del pH (IDAE, 2007).

4.2.5 Proporción Carbono a Nitrógeno (C/N)

La proporción C/N representa la relación entre la cantidad de carbono y nitrógeno en el material orgánico. La relación de estos elementos no debería ser ni alta ni baja. En caso de una alta proporción C/N la metanogénesis consume rápidamente el nitrógeno, resultando en un bajo rendimiento de formación de biogás. Por otro lado, un valor bajo causa acumulación de amoníaco y aumento de pH hasta alcanzar valores de 8.5, el cual es tóxico para las bacterias metanogénicas.

Según Weiland (2006) con rangos de 20 – 30 C/N se obtienen altos rendimientos de producción de biogás. Parkin y Owen (citado por Weiland, 2006) también aseveran que el óptimo valor es el mencionado. Sin embargo, este valor puede variar en función del tipo de material orgánico tratado. Para mantener las relaciones adecuadas de C/N se pueden mezclar diferentes materiales que contengan bajos valores con otros de altas proporciones (Kothari *et al*, 2014).

4.2.6 Rendimiento de Metano (CH₄)

Maximizar el rendimiento de CH₄ es de primordial importancia en el diseño del reactor y desempeña un papel clave en la manipulación de las condiciones de operación, puesto que depende de la optimización de las demás variables.

El rendimiento del metano se calcula en metros cúbicos, ya sea por unidad de influente diario o por unidad de materia orgánica depurada, y representa el indicador más importante del correcto funcionamiento del sistema en general siendo la base de la toma de decisiones para la manipulación de los otros parámetros.

Todos los parámetros antes mencionados necesitan ser considerados al momento de diseñar el sistema de digestión anaerobia en vía seca y su correcta administración brindará los rendimientos esperados.

4.3 Tipos de tecnologías en digestión anaerobia

Una amplia variedad de sistemas han sido desarrollados para el tratamiento de diversos tipos de residuos orgánicos en condiciones anaerobias. Esos sistemas pueden ser categorizados de acuerdo a las variaciones en los procesos a como se describe a continuación:

Sólidos totales

Proceso en vía húmeda La materia de entrada es suspendida por una gran cantidad de agua, hasta lograr una concentración de 10-15 % de ST

Proceso en vía seca La materia empleada contiene de 20 – 40 % de sólidos totales

Alimentación al digester

Proceso discontinuo Las balsas son cargadas del material a tratar e inoculado con digesto de otro reactor, posteriormente es sellado hasta que ocurre la digestión para ser vaciado y alimentado con una nueva mezcla de materia orgánica.

Proceso continuo El sustrato es continuamente alimentado al reactor, al mismo tiempo el efluente es descargado.

A los pasos implicados

Sistema de una etapa Todas las fases de la digestión ocurren en un reactor.

Sistema de etapas múltiples Consiste en varios reactores, a menudo la etapa de formación de AGV de la digestión, es separada de la etapa de formación de metano.

Conforme al material alimentado

Co-Digestión El material orgánico es mezclado con otro sustrato biodegradable, lo que mejora el proceso de digestión por mantener la relación C/N y por ende la producción de gas.

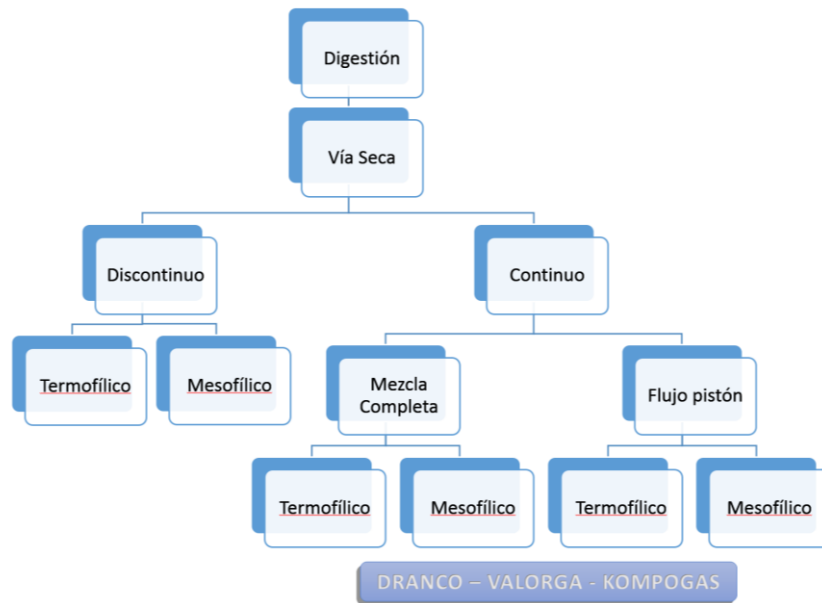


Figura 2. Tecnologías disponibles en Digestión Anaerobia en vía seca

5. Tratamiento de Fangos de EDAR

La gestión y tratamiento de los fangos generados en los decantadores primarios y secundarios, o en los propios reactores biológicos, que representan el mayor volumen de residuos, se va a realizar en la línea de fangos de la EDAR. La línea de fangos tiene tanta importancia, o más, que la línea de agua. Hoy en día, con todas las variadas estrategias de recuperación energética, la línea de fangos es más compleja que la línea de agua (Suárez & Jácome, 2007).

En la línea de agua hay dos fuentes de producción de fangos: la decantación primaria y decantación secundaria, ambas de procedentes de la línea de aguas. Las principales características son la causa de la complejidad de su tratamiento, entre las que se mencionan (Rulkens, 2008):

- Contiene gran cantidad de materia biodegradable
- Posee alto grado de patogenicidad
- El contenido de agua es aproximadamente 99 %, por lo que el volumen es importante
- Contenido de metales pesados dependiente del tipo de agua tratada
- El contenido N y P le dan importancia como fertilizantes y la producción de biogás puede hacer posible la generación de energía y calor.

La línea de fangos convencional se muestra en la figura 3 y consiste en el tratamiento biológico de un lodo con alta proporción de agua, lo que conlleva grandes volúmenes de tratamiento y por ende de reactores, altos costos de infraestructura y bajos rendimientos de energía por unidad de materia degradada.

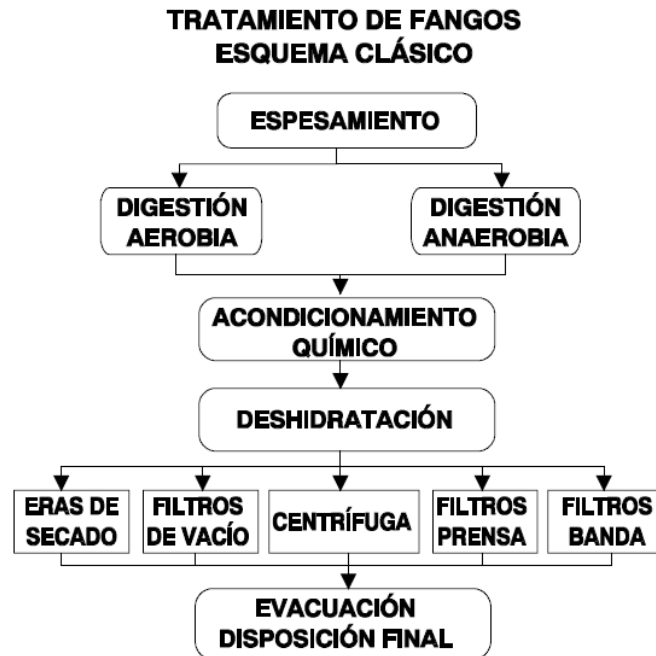


Figura 3. Línea de fangos – Convencional

Tomando en cuenta las características señaladas anteriormente se deben retomar ciertas mejoras en el esquema de tratamiento convencional, lo que implica:

- a. Minimizar el grado de patogenicidad del sólido estabilizado generado
- b. Disminuir los volúmenes de tratamiento mediante menores proporciones de agua
- c. Aumentar los rendimientos de recuperación de energía por unidad de materia depurada
- d. Alcanzar una optimización energética para la autosostenibilidad en las EDAR
- e. Mejorar la calidad del fertilizante obtenido posterior al tratamiento

Para suplir tales mejoras, se deberá pasar de un sistema convencional de tratamiento a uno personalizado, como la digestión anaerobia en vía seca, que es una técnica más aplicada actualmente para residuos sólidos orgánicos municipales y que puede ser empleada en la estabilización de fangos.

5.5 Digestión anaerobia en vía seca para el tratamiento de fangos de EDAR

La digestión anaerobia en vía seca es un método atractivo para la estabilización de residuos orgánicos con altas concentraciones de sólidos (22 – 40 %). Su reducido costo y potenciales subproductos obtenidos en el proceso han despertado interés en investigadores (Kothari *et al*, 2014).

En este sistema se tiene la capacidad de trabajar con altas concentraciones de sólidos y dispone de menos requerimientos de agua de proceso, menores gastos de calor y menor volumen de reactor (Schäfer *et al*, 2006).

Con referencia específica a la aplicación de la digestión anaerobia a gran escala industrial, los antecedentes históricos determinan que el proceso húmedo ha sido más empleado, hasta épocas más recientes, la vía seca prevalece gracias a las ventajas antes mencionadas. Las tecnologías más aplicadas para proceso en seco son: Draco, Valorga, Linde y Kompostogas, todas trabajan en proporciones de 20 – 40 % de sólidos totales alimentados al reactor (Reith *et al*, 2003).

Para el tratamiento de fangos de depuradora, el tratamiento mediante digestión anaerobia convencional ha perdido interés, puesto que los subproductos obtenidos no compensan el costo de establecimiento, operación y mantenimiento de la planta.

El tratamiento en vía seca, puede proporcionar mayores rendimientos de biogás y mejor calidad de material bioestabilizado. Esto conlleva a una mejor relación costo – beneficio. El presente sistema, trabaja con fangos más espesos, con mayor contenido de materia biodegradable, por lo tanto, el volumen de biogás por unidad de materia depurada será mayor. Además, las temperaturas de operación (termofílico, 55° C) permiten obtener un producto libre de patógenos.

Mediante esta técnica, se podrán solventar muchas limitaciones que presenta el sistema convencional, y también obtener un mejor balance energético en la EDAR.

5.5.1 Diferentes sistemas de digestión anaerobia en vía seca

Para la digestión anaerobia en vía seca se han investigado el empleo de variados tipos de sustrato, como residuos sólidos urbanos, desechos de la agricultura e incluso residuos de alimentos (Duan *et al*, 2012), sin embargo, hasta el momento no se han reportado estudios enfocados en lodos de depuradora como materia prima.

Fujishima *et al* (1999) había sugerido un sistema en el cual los fangos deshidratados descargados de pequeñas EDAR son recogidos y enviados a una planta centralizada de digestión anaerobia.

En Europa, la tecnología utilizada para el tratamiento de los lodos procedentes de las EDAR es la digestión en vía húmeda, a pesar de la abundante aplicación de esta técnica, no siempre es factible, pues los altos costos y difícil operación de grandes volúmenes de sustrato provocan el descuido y funcionamiento inadecuado.

Dentro de los procesos de digestión anaerobia en vía seca, las tecnologías más empleadas son Dranco, Valorga y Kompogas (Tabla 1), que en su mayoría trabajan con proporciones de sólidos totales de 20 – 40 % (Bolzonella *et al*, 2006). En la tabla 1 se muestran los parámetros básicos y rendimientos obtenidos en las diferentes tecnologías de vía seca.

Tabla 1. Sistemas de Digestión en vía seca

| Sistema | Tipo de Reactor | T (°C) | OLR (kg SV/m³d) | TR (d) | Eliminación SV (%) |
|----------------|------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------|---------------------------|
| DRANCO | Vertical/continuo | 50 - 55 | 10 a 15 | 20 | 40 a 70 |
| VALORGA | Vertical/continuo | 37 - 55 | 10 a 15 | 18 a 25 | 60 |
| KOMPOGAS | Horizontal/continuo | 55 | 4.3 | 29 | No disponible |

Fuente: (Karthikeyan & Visvanathan, 2013)

En la tabla 1 se muestran los diferentes sistemas desarrollados más ampliamente en la actualidad, de los cuales el VALORGA presenta la mayor flexibilidad en la manipulación de los parámetros de operación, por lo cual es el que se empleará para el presente estudio. La ventaja que nos ofrece esta técnica, entre otras, es que es posible trabajar con microorganismos termofílicos cuyas condiciones de temperaturas óptimas están entre los 55 ° C, lo que además, permite obtener un producto sólido bioestabilizado libre de patógenos.

5.5.2 Importancia del Sistema seleccionado

A como se mencionó anteriormente, el sistema VALORGA será el que optará el presente estudio, ya que dentro de la variedad de ventajas que éste presenta esta la adaptabilidad para trabajar a condiciones termofílicas (55 ° C) que es una opción con otra línea de beneficios, dentro de los que se encuentra la higienización de los fangos.

En la actualidad existen dos formas para la desinfección de lodos, la primera es mezclar con cal viva y la segunda consiste en la exposición a altas temperaturas, la segunda opción resulta ser más práctica, puesto que la aplicación de cal viva aumenta el volumen de la mezcla, dificulta las operaciones y la valoración como fertilizante.

Araque (2006), evaluando tratamientos térmicos en la desinfección de lodos procedentes de una planta de tratamiento de aguas residuales, concluye que exponer a temperaturas de 80 ° por 30 minutos sana y disminuye las concentraciones de patógenos por debajo de los límites exigidos por normativas internacionales, no obstante no descarta una estabilización posterior para su aprovechamiento en la agricultura y evitar la generación de olores o atracción de vectores.

Por otro lado, la Junta de Castilla y León recomienda la digestión termofílica con tiempos de exposición mínimo de 4 horas a 55 ° C dentro del tiempo de retención de los lodos en el reactor para obtener un material estabilizado libre de patógenos.

Igualmente, Fytili & Zabaniotou (2008) sugieren como técnica de pasteurización de lodos de depuradora una exposición de al menos 20 minutos bajo 70 ° C o 4 horas a 55 ° C para lograr la eliminación de organismos patógenos.

5.5.3 Descripción del Sistema Valorga

El sistema VALORGA se lleva a cabo mediante un proceso continuo mezcla completa de una etapa y fue desarrollado en Francia (Kothari *et al*, 2014). El diseño de este proceso consiste en un reactor cilíndrico vertical dividido por una pared igualmente vertical en el centro. La alimentación se introduce en el reactor a través de la entrada existente cerca de la base del mismo y lentamente se mueve alrededor del plato vertical hasta que es descargado mediante la salida localizada en la posición diametralmente opuesta a la entrada.

El biogás recirculado se inyecta mediante una red de inyectoros situados en la base del reactor y las burbujas ascendentes provocan la agitación mecánica de la mezcla. Estos inyectoros requieren de un regular mantenimiento para evitar atascos.



Figura 4. Digestor del proceso VALORGA

Ventajas del sistema

En comparación con la digestión anaerobia en vía húmeda, la digestión seca conlleva una serie de ventajas como:

- Permite trabajar con cargas orgánicas elevadas, lo que implica un menor requerimiento de espacio, y reduce el consumo de agua y energía. Esto implica que los costes de inversión se reducen.
- Los costes de operación asociados a la gestión del producto resultante del proceso (transporte de lodos) también son menores, puesto que no sólo disminuye su cantidad, sino que se facilita su manipulación por tratarse de un producto con una consistencia más sólida.
- Conlleva el aumento de la producción de biogás (energía) puesto que trabaja en alta concentración de lodos (mejor balance energético).
- Los lodos que se generan presentan un mayor grado de estabilización e higienización, facilitando así el cumplimiento de la futura legislación europea, y por tanto la aplicación en campos agrícolas.
- Esta tecnología presenta una amplia aplicación potencial pudiendo implantarse de manera descentralizada (biometanización mancomunada de varias depuradoras) mejorando así la gestión de los lodos de la zona.
- El uso de esta tecnología en co-digestión con otros residuos permitiría la valorización de otras materias primas del territorio.

Desventajas del sistema

El sistema de digestión anaerobia en vía seca presenta el inconveniente de que en ciertos momentos muestra problemas de inhibición, los cuales son debidos posiblemente a la gran cantidad necesaria de inóculo, largos tiempos de retención, acumulación de AGV y el tipo de materiales de desecho sólidos complejos (Kothari *et al*, 2014).

Por consiguiente, para desarrollar un adecuado y factible proceso de digestión anaerobia mediante la vía seca, es importante revisar y sugerir la mejora necesaria para el enfoque sostenible. Donde se incluyan aspectos operacionales, económicos, de balances energéticos y másicos y de impacto ambiental.

La Tabla 2 muestra las características operacionales del sistema Valorga.

Tabla 2. Parámetros de operación del Sistema Valorga

| Parámetros | Unidades | Valor |
|----------------------|--|-------------|
| Temperatura | ° C | 37 – 55 |
| pH | | 7 – 7.2 |
| Tiempo de Retención | d | 18 – 25 |
| Carga orgánica | kg SV/m ³ .d | 10 – 15 |
| Contenido de metano | % | 54 |
| Producción de metano | Nm ³ CH ₄ /kg SV | 0.21 – 0.30 |

Fuente: (Karthikeyan & Visvanathan, 2013)

El proceso Valorga consta de las siguientes etapas:

1. Recepción del residuo y posterior preparación: El sustrato alimentado debe ser sometido a un pre-tratamiento, en el cual la fase inorgánica y material reciclable presente en la mezcla se separa de la orgánica.
2. Etapas de digestión anaerobia: El agua recirculada del proceso se mezcla con la fracción orgánica separada en la fase anterior, formando un espeso lodo que es bombeado al digestor, la inyección de vapor provee el calor necesario y se obtienen valores de tiempo de residencia de 3 semanas. El gas es recirculado a la base del digestor para mantener una mezcla dentro del mismo. Por último, los licores extraídos del digestor pasan a una prensa de tornillo y/o centrifugas con el fin de separar los sólidos del líquido de digestión. La fracción sólida producida es llevada a la unidad de post-tratamiento aerobio.

3. Utilización del biogás: El biogás producido en el proceso puede ser utilizado para la producción de electricidad o para obtener energía calorífica, o también, previa purificación, como combustible para el transporte.
4. Post-tratamiento aerobio y refino: Después de la etapa de digestión anaerobia, el material fibroso producido es enviado para maduración y secado. Esto es conseguido mediante el emplazamiento del material en hileras cerradas donde se almacena durante 2 semanas aproximadamente.

5.5.4 Obtención de inóculo

El inóculo debería ser fresco, de algún tipo de reactor anaerobio activo, por ejemplo, lodos de reactores o lecho de lodos de reactor (UASB) y con el objetivo de asegurar que los diferentes sustratos provoquen ciertas limitaciones (Angelidaki *et al*, 2009).

6. Dimensionamiento de un Sistema de Digestión Anaerobia en Vía Seca para el tratamiento de fangos de EDAR

6.1 Descripción de aguas residuales recibidas en EDAR

Los fangos que se disponen a tratamiento son generados de una EDAR que recibe en promedio 4080 m³ de aguas residuales urbanas diariamente con una concentración de 0.68 kg DQO/m³. En la tabla 3 se muestran parámetros de descripción de las aguas residuales, el tratamiento consta de una decantación primaria lamelar, sucedida por la digestión biológica y su respectiva sedimentación secundaria. Los lodos primarios y secundarios son generados en los decantadores lamelares y será el objeto de estudio en el presente diseño de línea de tratamiento. En la tabla 3 se muestra la caracterización básica del agua recibida en la EDAR:

Tabla 3. Caracterización de aguas residuales de la EDAR

| Parámetros | Agua de entrada | Agua depurada | Porcentaje de eliminación % |
|--------------------------|-----------------|---------------|-----------------------------|
| Caudal (m ³) | 4079.62 | 4079,62 | - |
| SST (mg/L) | 359.38 | 23,00 | 94% |
| DBO5 (mg/L) | 343.06 | 20,69 | 94% |
| DQO (mg/L) | 679.63 | 69,56 | 90% |
| Pt (mg/L) | 6,59 | 0,96 | 85% |
| NT (mg/L) | 54,57 | 37,31 | 30% |

Como se puede observar en la tabla 3 las aguas residuales ingresadas en la EDAR cuentan con una concentración de nitrógeno y fósforo que son removidos y arrastrados a los fangos y les favorece su valor como fertilizante. De igual manera, se eliminan sólidos totales en un 94 %, posteriormente éstos constituirán la composición principal del lodo a depurar.

6.2 Descripción de los fangos

La EDAR, en las etapas de decantación tipo lamelar, produce fangos primarios y secundarios. El volumen promedio con el que fluyen diariamente estos lodos es de 16070 m³ en total. Ingresan 10098 m³ al día de fangos primarios que arrastran una concentración de 2.22 kg SV/m³ y de lodos secundarios se reciben 5971,98 m³/d con 3.43 kg SV/m³. Ambos tipos de lodos son espesados separadamente y luego mezclados en un homogeneizador para su posterior deshidratación y digestión anaerobia.

Tabla 4. Descripción de las condiciones de los lodos a depurar

| Valores Promedio | Fango Primario | Fango Secundario |
|----------------------------|----------------|------------------|
| Caudal (m ³ /d) | 10098.25 | 5971.98 |
| ST (kg/m ³) | 2.64 | 4.08 |
| Materia Volátil (%) | 83.81% | 83.78% |
| SV (kg/m ³) | 2.22 | 3.43 |

En la tabla 4 se describen las condiciones generales en las cuales ingresan los lodos a la línea de fangos diariamente. Estos valores son un promedio obtenido de 12 meses de registros. El valor de concentración con el que se trabaja para calcular la producción de biogás es el de los sólidos volátiles, ya que son los que las bacterias pueden convertir a gas mediante los procesos de digestión anaerobia mencionado en acápite anteriores.

6.2.1 Balance de masa de fangos

Para la realización del balance de masas se toma referencia de estudios realizados por Gans *et al* (2007), en la siguiente figura se observan los procesos en general, entradas y salidas. En la figura se observa que en el proceso de espesamiento se arrastran 256 toneladas al mes, a través de las aguas que se recirculan para tratamiento y en la deshidratación 51 t. El lodo que se estabiliza en el reactor es recirculado a deshidratación para concentrar los sólidos hasta 25 %.

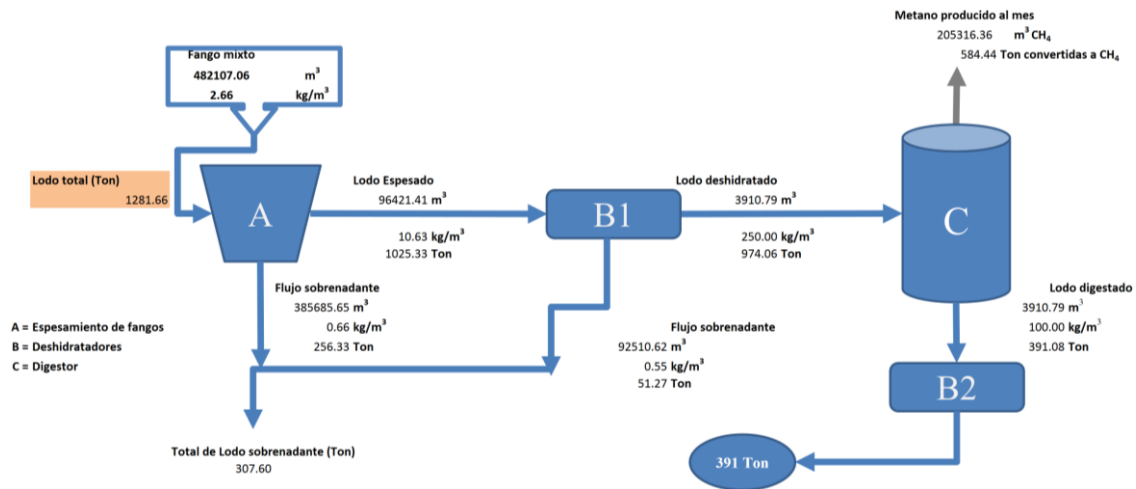


Figura 5. Balance de masas de línea de fangos

En la tabla siguiente se muestra el porcentaje de sólidos que son recirculados en cada etapa del proceso de tratamiento de lodos.

Tabla 5. Cálculos realizados en el balance de masas

| Proceso | Equipo de planta | Descripción |
|----------------|------------------|---|
| Espesado | A | El espesador elimina el 80 % del volumen de los fangos liberando un fluido con 99 % de humedad que es transportado a deshidratación |
| Deshidratación | B1 y B2 | La deshidratación mediante filtros prensa concentra los sólidos hasta un mínimo de 20 %, reduciendo un gran volumen ocupado por el agua |
| Digestión | C | Proceso que estabiliza los sólidos, convirtiendo 60 % a biogás y 40 % sale en el efluente con 10 % de humedad |

En la tabla 5 se muestran los cálculos que se hicieron para lograr determinar el balance de masas. Describiendo la proporción en que los sólidos son convertidos en general durante el tratamiento.

6.3 Calculo de volumen y dimensiones de las herramientas de tratamiento

6.3.1 Espesamiento de fangos

Mediante el espesamiento de los lodos se consigue una reducción del volumen de aproximadamente un 30 – 80 % antes de cualquier tratamiento (Lenntech BV, 2015).

Existen dos tipos de técnicas de espesamiento de fangos de depuradora: por gravedad y por flotación. La opción seleccionada es el espesamiento por gravedad. Para el diseño se utiliza una velocidad ascensional de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, que es lo óptimo cuando se trabaja a régimen de caudal punta.

La etapa de espesamiento se realiza por separado, fangos primarios y secundarios, llevándose a cabo en tres espesadores, dos para lodos primarios y uno para secundarios. Para conocer el volumen del espesador se debe calcular la superficie horizontal del depósito, para lo cual se emplea la siguiente expresión matemática:

$$A_{\text{sed}} = \frac{Q}{U}$$

Donde;

A_{sed} = Superficie horizontal de depósito (m^2)

Q = Caudal de fangos (m^3/h)

U = Velocidad ascensional ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$)

Las dimensiones y los parámetros empleados para su diseño se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 6. Parámetros de diseño de espesadores

| Parámetro | Simbología | Unidad de medida | Fangos primarios | Fangos secundarios |
|--------------------------------|------------------|------------------------------------|------------------|--------------------|
| Velocidad Ascensional | U | $\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{d})$ | 100,00 | 40,00 |
| Caudal | Q | m^3/h | 420,76 | 248,83 |
| Tiempo de retención Hidráulico | TRH | h | 3,00 | 2,00 |
| Área de sedimentación | A_{sed} | m^2 | 100,98 | 149,30 |
| Diámetro | D | m | 11,34 | 13,79 |
| Volumen | V | m^3 | 631,14 | 497,67 |
| Profundidad | P | m | 6,25 | 3,33 |

En la tabla anterior se muestran las dimensiones de los espesadores diseñados, los caudales de alimentación en cada espesador son: para fangos primarios $420.76 \text{ m}^3/\text{h}$ y para secundarios $248.83 \text{ m}^3/\text{h}$, con tiempo de retención hidráulico de 3 y 2 horas, respectivamente.

El espesamiento de fangos primarios recircula un caudal de sobrenadante líquido de 8078.60 m³/d con 0.56 kg/m³ de concentración a la línea de tratamiento de aguas de la EDAR. Por otra parte, el lodo secundario recircula 4777.59 m³/d con 0.86 kg/m³.

El bombeo a los espesadores es mediante bombas de tornillo helicoidal con capacidad de 120 m³/h. Se cuenta con cuatro bombas para impulsar los fangos primarios a espesamiento, mientras que para los secundarios se tienen dos, de igual capacidad.

A la salida de cada espesador los fangos son impulsados al homogeneizador de 535 m³, donde se mezclan con un tiempo de retención hidráulico de 4 horas y posteriormente son enviados a la deshidratación.

En la homogeneización se produce la mezcla que será deshidratada e ingresada al digestor, el fango mixto transportado al reactor fluye con un volumen de 130 m³ por día y concentra los sólidos volátiles en 250 kg/m³ éstos serán los que, el consorcio de bacterias, convierten a biogás.

6.3.2 Deshidratación

Fangos mixtos son alimentados a la fase de deshidratación, utilizando 3 centrifugas con capacidad individual de 50 m³/h, logrando concentrar 135 m³/h a 20 – 25 % de sólidos totales (masa/masa), condición óptima para alimentar el reactor de Digestión Anaerobia en Vía Seca – VALORGA. La fase líquida separada por la centrifuga es retornada a la línea de aguas con un caudal de 128.49 m³/h y concentración de 0.56 kg/m³.

Para el proceso de deshidratación de los fangos mixtos no es necesaria la aplicación de ningún tipo de floculante debido a que la proporción de sólidos totales requerida es mínimo 20 % y la maquinaria cuenta con la capacidad suficiente.

6.3.3 Digestor Anaerobio – VALORGA

Posterior a la deshidratación se da la digestión de la mezcla de fangos en un reactor de digestión anaerobia ejecutado mediante el sistema VALORGA. Las condiciones de operación óptimas de esta tecnología se presentan en la tabla 2. Los fangos deshidratados con 20 % de sólidos totales son impulsados por una bomba diseñada para altas concentraciones de sólidos con una capacidad de 44 m³/h.

El digester diseñado es alimentado por un caudal de 130.36 m³/d con una concentración de 250 kg/m³. La proporción de sólidos totales es de un 20 % y transporta una carga orgánica de 13.89 kg SV/m³.d.

Para el influente tratado se diseñan dos reactores de 1174 m³ que eliminan el 60 % de los sólidos, correspondiente a 19.55 toneladas al día. En la tabla 7 se registran los datos utilizados en el diseño del reactor de tratamiento anaerobio con 9 m de diámetro y el doble de altura (18 m), en el cual la materia se somete a digestión durante 18 días a temperaturas termofílicas (55 ° C).

Tabla 7. Parámetros de diseño del digester

| Parámetro | Valor | Unidad |
|-------------------------|--------|------------------------|
| Caudal | 130.36 | m ³ /d |
| Concentración | 250.00 | kg SV/m ³ |
| TR | 18 | d |
| OLR | 13.89 | kg SV/m ³ d |
| Volumen requerido | 2347 | m ³ |
| Número de reactores | 2 | Unidades |
| Volumen de c/Reactor | 1174 | m ³ |
| Diámetro de digester | 9 | m |
| Profundidad de digester | 18 | m |

El biogás generado en la digestión anaerobia se almacena en un gasómetro con volumen de 2000 m³. Además, los biosólidos obtenidos cuentan con un 90 % de humedad y se producen 391 toneladas diarias, que serán destinadas a usos agrícolas por su riqueza en contenido de nutrientes y bajos niveles de patogenicidad.

La agitación del reactor se realiza con recirculación de biogás mediante el empleo de un compresor, el cual presuriza el gas a través de orificios en la base del reactor y las burbujas ascendentes provocan la agitación mecánica de la mezcla. Estos inyectores requieren de un regular mantenimiento para evitar atascos en el sistema. La presión requerida para la agitación, por tratarse de un lodo muy denso debido a la alta proporción de sólidos, requiere de valores altos de aproximadamente 8 bares.

La potencia que se proporciona la formación constante de biogás es de 6920 W. Para el cálculo de este dato se emplea la siguiente fórmula:

$$P = Pa * Qa * Ln\left(\frac{Pc}{Pa}\right)$$

Donde;

P = Potencia (W)

Pa = Presión atmosférica (kN/m² – 101.325 kN/m²)

Qa = Caudal de gas (m³/s)

Pc = Presión de descarga (kN/m²)

Para obtener la presión de descarga (Pc) se utiliza la expresión matemática:

$$P = Pa + \rho gh$$

Donde;

P = Potencia (W)

Pa = Presión atmosférica (kN/m² – 101.325 kN/m²)

ρ = Densidad del biogás (kg/m³)

Pc = Presión de descarga (kN/m²)

En la tabla 8 se muestran los cálculos a partir de las expresiones matemáticas presentadas anteriormente.

Tabla 8. Cálculo de potencia en reactor

| Parámetro | Símbolo | Unidad | Potencia disipada del Biogás formado | Compresor |
|---------------------|-----------|-------------------|--------------------------------------|-----------|
| Potencia | <i>P</i> | kW | 6.92 | 13.02 |
| Potencia | <i>P</i> | W | 6920 | 13020 |
| Potencia | <i>P</i> | W/m ³ | 5.90 | 11.10 |
| Presión atmosférica | <i>Pa</i> | kN/m ² | 101.33 | 101.33 |
| Caudal de biogás | <i>Qa</i> | m ³ /s | 0.07 | 0.13 |
| Presión de descarga | <i>Pc</i> | kN/m ² | 272.22 | 272.22 |
| Densidad | ρ | kg/m ³ | 1.08 | 1.08 |
| Gravedad | <i>g</i> | m/s ² | 9.80 | 9.80 |
| Altura reactor | <i>h</i> | m | 16.15 | 16.15 |

En la tabla anterior se presentan los valores de presión de descarga y potencia, tomando en cuenta que la densidad del biogás es de 1.08 kg/m³ según la FAO (2010). La potencia

suministrada para agitación será un total de 17 W/m^3 , mediante la recirculación de biogás a caudal de 15.60 m^3 cada dos minutos con el empleo de un compresor, este valor es necesario para la mezcla densa en el digestor.

En la figura 5 se describe a detalle el funcionamiento del digestor anaerobio, la inyección del gas recirculado para la agitación del material en digestión que se descarga a una presión de 272.22 kN/m^2 . Las turbinas son las encargadas de la generación de energía y del calor necesario para mantener la temperatura del reactor a 55° C .

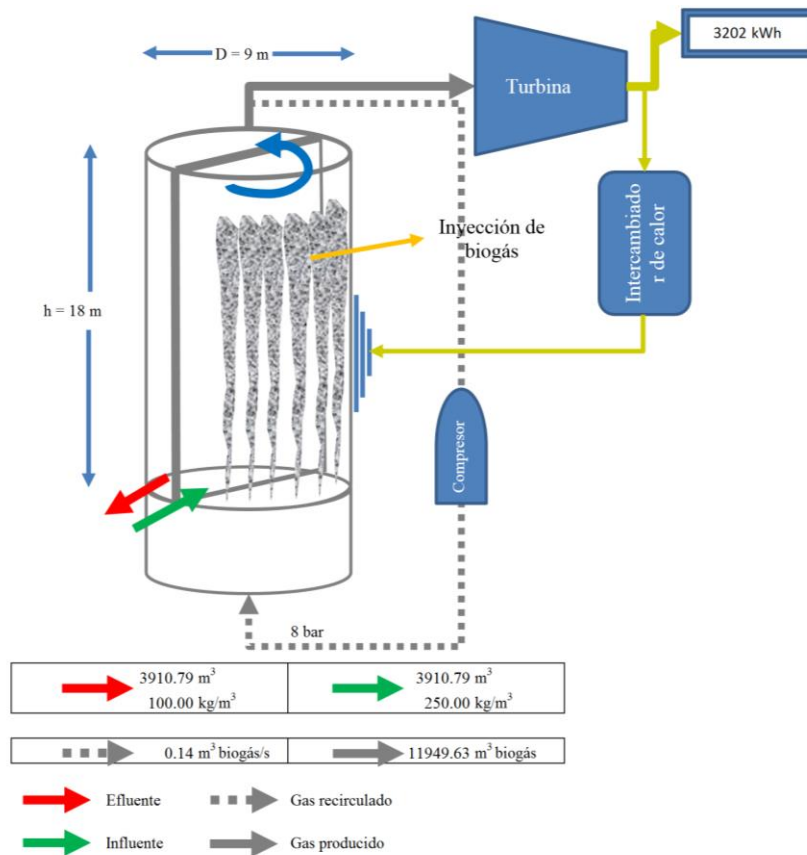


Figura 6. Funcionamiento de Digestor Anaerobio VALORGA

La figura 6 representa el esquema de la planta, que está compuesta por tres espesadores (1, 2 y 3) dos para fangos primarios (1 y 2) impulsados por 4 bombas de $120 \text{ m}^3/\text{h}$. un tercer espesador para los fangos secundarios que ocupan dos bombas de la misma capacidad.

Fangos espesados son transportados hacia el homogeneizador de 535 m^3 , el sistema de bombeo consiste en una bomba de tornillo de $55 \text{ m}^3/\text{h}$ para cada espesador.

Continuando el sistema, los fangos mezclados se deshidratan en dos máquinas con capacidad de 45 m³/h para luego ser impulsadas por bombeo (Bomba para altas concentraciones de sólidos – 44 m³/h) a los digestores VALORGA. El biogás generado se envía a dos gasómetros para energía.

El efluente del digestor cuenta con un 10% de sólidos totales y se deshidrata (25 % de sólidos) para luego ser almacenado en un silo de 400 m³ para su posterior empleo en la agricultura.

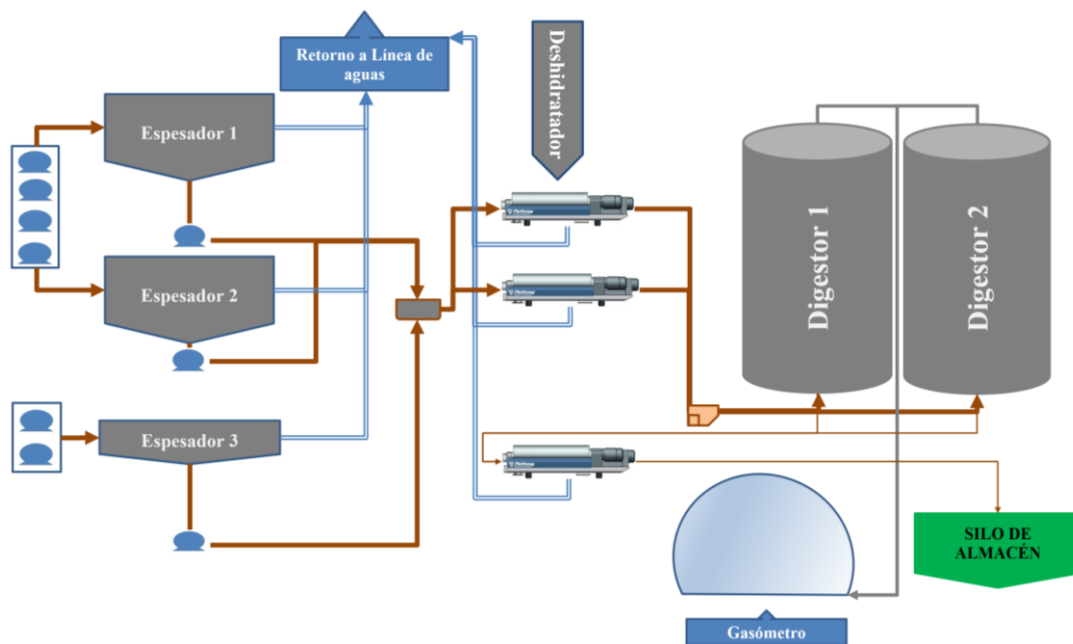


Figura 7. Esquema de planta de tratamiento de fangos

- Línea de transporte de los fangos
- Línea de transporte de agua
- Línea de transporte de biogás

7. Aprovechamiento de productos de la Digestión

En el proceso de digestión se obtienen unos fangos estabilizados con alto valor nutritivo para el crecimiento de las plantas, tanto de Nitrógeno como de fósforo, que son elementos esenciales. Por consiguiente se pretende su uso en la agricultura como fertilizante, tomando en cuenta las legislaciones y normas pertinentes.

Otro producto del proceso es el biogás, considerado como el más importante por la gama de beneficios que brinda al ambiente y a la autosostenibilidad de la EDAR. La producción

del gas será determinada por la masa de sólidos eliminados en el proceso de digestión y el uso es la generación de energía.

Ambos productos son recursos renovables por originarse a partir de la biomasa y proporcionan una base para la autosostenibilidad energética y posiblemente económica de la EDAR.

7.1 Factores económicos y energéticos asociados con el proceso de digestión anaerobia en vía seca.

La energía neta producida por la digestión en vía seca es reportada siempre más alta que sistemas convencionales o húmedos, sin embargo, la configuración del sistema y las condiciones de operación son importantes y deben ser adecuadas para obtener ganancias de la energía generada y poder comercializar (Karthikeyan & Visvanathan, 2013).

Por ejemplo, la energía neta ganada en el sistema VALORGA ha sido calculada por Karagiannidis & Perkoulidis (2009) obteniendo 700 kWh/Ton en una planta de tratamiento de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos.

Wilkinson (2011), citado por Karthikeyan & Visvanathan (2013); destaca que el incremento de los costos de construcción y de la cosecha de energía puede poner la viabilidad financiera de la planta de digestión anaerobia en riesgo. Por consiguiente, es necesario emplear la digestión anaerobia en vía seca, puesto que es capaz de conseguir mayores rendimientos de biogás y disminuir la inversión en infraestructura.

Otra posible fuente de obtención de ingresos es la venta del material estabilizado, después de un postratamiento.

Al decidir la comercialización del producto se debe tomar en cuenta la relación oferta-demanda, la calidad de éste y las normas específicas de la localidad, pues son los principales factores que dominan el valor económico. Por lo tanto, una mayor comprensión de la calidad del residuo y los datos específicos de la región sobre la cadena oferta-demanda es necesaria para un balance económico positivo.

7.2 Producción de biogás

La principal causa para reconsiderar la cosecha de energía por conversión de metano es el impacto ambiental del uso de combustibles fósiles.

A medida que aumenta la población y se desarrolla la tecnología se comienza a reflejar un agotamiento significativo de recursos y deterioro medioambiental, esto implica un cambio importante a recursos renovables para obtener energía.

Energía renovable: El uso de biomasa como recurso energético no solo es más verde, sino también que la conforma un ciclo cerrado y equilibrado de carbono con respecto al dióxido de carbono atmosférico. La sustitución de los combustibles fósiles además, podría mitigar los niveles de CO₂ atmosférico.

Más del 60 % de las emisiones de GEI de origen antropogénico son debido a la generación energética a partir de los combustibles fósiles (Herzog, 2009). Por lo tanto, se estudian intensamente posibles alternativas para la generación de energía.

Los residuos orgánicos, perjudican la calidad del medio ambiente y la salud humana, sin embargo, pueden utilizarse como recurso para generar energía renovable.

Metano: La biomasa puede ser convertida a una variedad de formas de energía (calor, vapor, electricidad, etc.). La selección de un producto para conversión depende de muchos factores, incluyen las eficiencias de conversión, el transporte de energía, uso de hardware, economías de escala, necesidades inmediatas y el impacto ambiental del proceso.

Bajo la mayoría de las circunstancias el metano es un combustible ideal. A partir del año 2000 en EUA representa el 20% de los suministros de energía. Comparado con otros combustibles fósiles, el metano produce menos contaminantes atmosféricos y dióxido de carbono por unidad generada de energía (Chynoweth *et al*, 2001).

En el presente diseño se lleva a cabo una digestión seca que cuenta con 60 % de conversión de sólidos volátiles. Diariamente se remueven 20 toneladas de sólidos y se obtienen 11950 m³ de biogás que contiene 54 % de metano, esto corresponde a 6453 m³ de metano. La tabla 9 define las cantidades de biogás y la composición de metano.

Para estimar una producción de metano por unidad de masa de DQO eliminada se citan un conjunto de estudios experimentales al respecto y se calcula un promedio que permita brindar un valor más confiable. El promedio es de 0.33 Nm³ CH₄/kg de DQO eliminada tomado de trabajos de la International Water Association (2001), Álvarez *et al* (2010),

Cota-Navarro *et al* (2011) y Karthikeyan & Visvanathan (2013). Es a partir del dato mencionado que se puede valorar un volumen esperado de biogás.

Tabla 9. Generación de biogás

| Parámetro | Valor | Unidad |
|------------------------------|-------|-------------------------------|
| Eficiencia de remoción de SV | 60% | Porcentaje |
| SV Eliminados | 19554 | kg/d |
| Rendimiento de Metano | 0.33 | N m ³ /kg SV Elim. |
| Metano producido | 6453 | N m ³ |
| Contenido de CH ₄ | 54% | Porcentaje |
| Biogás producido | 11950 | N m ³ |

7.3 Aprovechamiento y rendimiento de energético

Podría decirse que el biogás es una fuente de energía renovable más versátil, ya que sus valores de energía son definitivos y de fácil almacén, por lo tanto el potencial de utilización es significativamente independiente de factores como localización geográfica y temporal.

El biogás puede ser usado directamente para calor y generación de energía, y es un sustituto de combustibles fósiles. En el presente estudio se pretende, mediante una digestión anaerobia de fangos de depuradora, obtener biogás para la generación de energía. Para ello se realiza toda la línea de fangos y se emplea un sistema llamado VALORGA ejecutado a través de la vía seca.

Shizas & Bagley (2004) primeramente realizan investigaciones en las cuales obtienen rendimientos energéticos en lodos primarios y secundarios de 15.90 y 12.40 kJ/g de DQO eliminada, respectivamente. En investigaciones posteriores, Wett *et al* (2007) utilizan un promedio de los rendimientos anteriores (14.15 kJ/g DQO Eliminada) para conseguir la energía producida en todo el proceso de tratamiento de aguas residuales incluyendo la digestión de los fangos.

Tabla 10. Valores utilizados para obtener rendimiento energético

| Fuente | Valor | Unidad de medida |
|--------|-------|------------------|
|--------|-------|------------------|

| | | |
|--|--------------|------------------------------|
| MARM, 2010 | 5.4 | kWh/m ³ de biogás |
| Shizas & Bagley, 2004 – Wett <i>et al</i> , 2007 | 14.15 | kJ/g de Materia seca |

La línea de fangos consiste en el espesamiento, continuando a deshidratación que preparan el lodo para su posterior alimentación a dos reactores VALORGA. El flujo preparado por los deshidratadores es de 3910,79 m³ con una concentración de sólidos de 250 kg/m³. Según Shizas & Bagley (2004) se obtienen 14.15 kJ por gramo de materia seca, mediante cálculos se obtiene una generación de 2305.74 MWh cada mes de funcionamiento. En la tabla 11 se muestran los cálculos para conseguir el rendimiento energético.

Tabla 11. Rendimiento energético mensual

| Materia seca (kg) | % de eliminación | MS eliminada (kg) | Rendimiento energético (kJ/g MS) | Energía (MWh) |
|-------------------|------------------|-------------------|----------------------------------|---------------|
| 977696,93 | 60% | 586618,16 | 14,15 | 2305.74 |

En la tabla 11 se presenta la cantidad de energía que se espera generar en un mes, debido a que el reactor convierte un 60 % de los sólidos de entrada en biogás que se aprovecha. Para la generación de energía eléctrica, se tendrán que accionar 4 turbinas de vapor de 500 kWh que serán alimentados por dos gasómetros de 1000 m³. Y una antorcha para quemar el biogás sobrante. Al día se espera producir 77 MWh.

La planta depuradora de aguas residuales que genera los fangos en estudio, cuenta con el consumo de energía que se presenta en la tabla 12.

Tabla 12. Consumo energético de EDAR

| | Depuración de agua (kW/d) | Bombeo (kW/d) | Total (kW/d) |
|------------------------|---------------------------|---------------|--------------|
| Promedio mensual (kWh) | 1464457.52 | 45292.50 | 1509750,02 |
| Porcentaje | 97% | 3% | 100% |
| kWh/d | 48815.25 | 1509.75 | 50325.00 |

El consumo diario de la planta en la línea de tratamiento de aguas es de 50 MWh, correspondiente 3 % a bombeo y 97 % en funcionamiento interno de los procesos de depuración. La producción de energía estimada del biogás es de 77 MWh por día.

La EDAR podrá suplir sus necesidades energéticas con la producción de biogás generada en la digestión anaerobia seca de los fangos, utilizando el 62 % de la energía producida.

Gikas & Tsoutsos (2012) afirman que el consumo de energía en el tratamiento del lodo es del 23 % del total consumido en la planta, por tanto, serían 15 MWh al día destinados para la línea de fangos.

De esta manera, es posible lograr una autosostenibilidad energética en la EDAR, y además se dispone con un excedente anual de 345 MWh que pueden ser comercializados.

7.4 Utilización de fangos depurados en la agricultura

Los fangos de las aguas residuales contienen nitrógeno y fósforo, resultantes especialmente de las fases de nitrificación – desnitrificación en la línea de aguas de la EDAR. Estos elementos son esenciales para el crecimiento de las plantas, sin embargo, también pueden contener al mismo tiempo otros elementos perjudiciales tanto para el humano como para el suelo (Fytili & Zabaniotou, 2008).

El marco legal que regula la aplicación de los lodos de depuradoras a los suelos agrícolas determina valores límite de metales pesados que no deben sobrepasarse. Así mismo, obliga a considerar las necesidades nutritivas de las plantas para fijar las dosis de aplicación de forma que no se vean afectadas la calidad de las aguas ni la del suelo (MARM, 2009). Otros aspectos regulados por la legislación es el contenido patogénico del fango depurado.

Por las razones anteriormente mencionadas se ve necesario un análisis del producto depurado cuya información será útil para proporcionarla a las entidades encargadas de vigilar las explotaciones de los lodos en la agricultura. Cabe señalar que en el presente diseño, el tratamiento se lleva a cabo mediante condiciones termofílicas que propician un fango con buenas condiciones respecto al contenido de patógenos.

La producción de fangos en la planta diseñada es de 391.08 toneladas al mes, estos lodos se consideran libres de patógenos debido al tratamiento térmico realizado mediante las condiciones de temperatura que se sometieron durante la digestión.

Para su aplicación en suelos agrícolas no se descarta la realización de un análisis para comprobar el nivel de ausencia o presencia de organismos patógenos y conocer el contenido de metales pesados, datos necesarios para las autorizaciones legales de su aplicación como fertilizante.

Es importante tomar en cuenta que el contenido de metales pesados dependerá del tipo de agua que alimente la EDAR, aguas residuales de industrias son las principales responsables de elevar los niveles de presencia de tales elementos.

8. Impacto ambiental de la técnica empleada

La digestión anaerobia de los fangos comprende una serie de beneficios al medio ambiente porque todos los productos del proceso son aprovechados, procurando así los siguientes resultados (Kothari *et al*, 2014):

1. Minimización del uso de vertederos y por ende de las emisiones de gases de efecto invernadero atribuidas al mismo
2. Mejora de la calidad del agua tratada sin provocar efectos secundarios perjudiciales
3. Recuperación de energía mediante la valorización de residuos
4. Reducción de demanda y uso de fertilizantes sintéticos que alteran en cierta medida las condiciones del suelo
5. Mejora de la calidad del aire a debido a menos emisiones de CO₂

8.1 Emisión de Gases de Efecto Invernadero

El incentivo más importante para el desarrollo de estos procesos de recuperación de energía es el impacto del uso de los combustibles fósiles, puesto que las energías renovables brindan una mayor seguridad para el desarrollo sostenible y la calidad ambiental (Chynoweth *et al*, 2001).

En los procesos de digestión anaerobia, la producción de energía emite 154 kg de CO₂ equivalente, por cada tonelada de residuos en tratamiento. Sin embargo, se debe convertir la totalidad de metano producida para lograr las emisiones mencionadas (Reeh & Møller, 2002).

La planta diseñada tiene la capacidad de ingresar 1286 toneladas al mes de sólidos en los fangos, por lo tanto se emiten 198 t de CO₂ equivalente mensualmente.

Según IPCC (1996) por cada GJ de energía producido a partir de combustible fósil se emiten 77 kg de CO₂ equivalente. Mediante el tratamiento de fangos de EDAR se

obtienen 8301 GJ/mes, tal generación conllevaría una emisión de 640 t de CO₂ equivalente si fuera originada a partir de combustibles fósiles.

La reducción registrada es de 70 % de CO₂ equivalente, esto comprende 441 toneladas de CO₂ que se evita que contaminen la atmosfera y acrecienten el efecto invernadero.

8.2 Metales pesados

Los metales pesados existentes en las aguas residuales tienden a acumularse en los fangos, y son la principal causa de contaminación del agua y el suelo. Las variadas formas en que se encuentran los metales pesados influyen significativamente la movilidad y biodisponibilidad de éstos en el ambiente y finalmente determinan el potencial de contaminación (Kim *et al*, 2002).

La acumulación de éstos en las aguas residuales depende de varios factores locales como son: el tipo de industria en la región, forma de vida de las personas y la conciencia del impacto ambiental por menospreciar la disposición de los residuos.

Estos afectan a microorganismos, macroorganismos y plantas, por lo tanto su presencia no solo afecta al ambiente externo, sino también reduce en gran medida la actividad microbiana del proceso de tratamiento.

La presencia de éstos en el fango tratado puede determinarse, bien durante la digestión y el rendimiento que ésta presente o en análisis posteriores al tratamiento, cuando ya se dispone de un sólido capaz de ser aplicado al suelo agrícola.

Durante la digestión se puede evaluar el rendimiento registrado en un determinado tiempo, puesto que la presencia de metales pesados puede ser perjudicial para la actividad microbiológica en el reactor y en caso de presentar bajas tasas de conversión y mala calidad de biogás es posible que una razón sea el contenido de estos elementos.

El análisis del lodo bioestabilizado es necesario para conocer y garantizar los niveles contenidos de estos elementos, además es importante por cuestiones legales y de normativas previo al uso en la agricultura.

8.3 Uso del sólido bioestabilizado en la agricultura

El sólido estabilizado es producto del tratamiento del fango y contiene gran cantidad de nutrientes que pueden acondicionar un suelo usado para la agricultura. El impacto que

éste puede provocar al ambiente es la incorporación de elementos perjudiciales para la biodiversidad y los recursos hídricos presentes en la zona.

A como se menciona en el apartado anterior, son los metales pesados los principales contaminantes. Por lo que es importante tomar en cuenta la legislación vigente sobre los límites de presencia de estos elementos en los lodos depurados. Además, se sugiere un monitoreo sistemático de las concentraciones de metales (da Silva *et al*, 2007).

Otro aspecto importante es el grado de patogenicidad del sólido bioestabilizado, que puede ser controlado mediante un tratamiento térmico durante la digestión, que es el caso del presente diseño que trabaja a condiciones termofílicas, para lograr disminuir el contenido de patógenos.

El impacto ambiental del sólido producido sería positivo al momento de usar en las agricultura como fertilizante, debido a que se evita la aplicación de insumos sintéticos que perjudican la dinámica ambiental del suelo y las aguas subterráneas si no se tienen los correspondientes conocimientos de dosificación, condiciones del suelo, profundidad de manto freático, etc.

Por lo mencionado, la aplicación del lodo como mejorador de suelos agrícolas es de mayor confiabilidad y rentabilidad, porque además, los precios son reducidos debido a que consiste en un reciclaje del residuo producido en la EDAR y se dispone de grandes cantidades, suficientes para suplir una demanda considerable.

Así tales fertilizantes sintéticos, que son producidos de extracciones de fuentes naturales no renovables, requieren combustibles fósiles para su procesamiento y provocan la emisión de grandes cantidades de GEI, disminuyen su uso y demanda para mitigar el impacto negativo que éstos representan.

9. Conclusiones

Con la realización del presente estudio se logra concluir que:

El empleo de la técnica de Digestión Anaerobia en Vía Seca, al permitir altas cargas orgánicas en el influente, los rendimientos energéticos son altos y el costo de infraestructura disminuye por trabajar con menos volumen al eliminar grandes cantidades de agua previo a la entrada al reactor.

La calidad del biogás generado depende de la optimización de los parámetros de operación, ya que éstos determinan la actividad microbiológica dentro del reactor, y su empleo condiciona también la eficiencia del sistema empleado.

Trabajar en condiciones de temperatura termofílicas, a 55 °C, la velocidad de degradación es mayor y proporciona un sólido de mejor calidad por tener bajos niveles de patogenicidad.

El sistema diseñado produce 391.08 toneladas al mes de sólidos estabilizados destinados al aprovechamiento en la agricultura como mejorador de suelos para suministrar nutrientes requeridos por las plantas que no logra suplir el contenido en el suelo, por lo que es necesario, antes de la aplicación, contar con un análisis del suelo a enmendar.

Otro producto generado en la planta es el biogás, estimando una obtención de 11950 m³ diarios y son utilizados para la generación de energía en cuatro turbinas de vapor de 500 kWh. La energía capaz de generar el biogás producido es de aproximadamente 76858 kWh diarios.

La EDAR que produce los fangos sometidos al tratamiento estudiado consume el 85 % de la energía producida, lo que permite disponer de aproximadamente 346 MWh al año que serían comercializados.

La reducción de emisiones de CO₂ equivalente es de 70 % conforme a lo que se emite con el empleo de combustibles fósiles para la generación de 1 GJ de energía, evitando la liberación de 441 t CO₂ equivalente.

10. Recomendaciones

Se recomienda, que en base a lo estudiado, se lleven a cabo futuras investigaciones sobre aspectos económicos de estos sistemas sobre fangos de depuradora, con el fin de conocer la capacidad de sostenibilidad que puede alcanzar una EDAR con el tratamiento eficiente de los fangos. Además, es una técnica interesante de evaluar sistemas para altas proporciones de sólidos para tratar mediante co-digestión anaerobia entre residuos orgánicos urbanos y fangos de depuradora para aumentar la eficiencia de la actividad tanto en eliminación de residuos como en producción energética.

11. Bibliografía

- Álvarez, J., Otero, L., & Lema, J. (2010). A Methodology for Optimising Feed Composition for Anaerobic Co-digestion of Agro-industrial Wastes. *Bioresource Technology*, 1153-1158.
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J., Guwy, A., & S. Kalyuzhnyi, P. J. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science & Technology*, 927-934.
- Araque, M. (2006). Evaluación de los Tratamientos Térmico y Alcalino en la Desinfección del Lodo Generado en la PTAR "El Salitre". Bogotá, CO: Universidad de Los Andes.
- Avendaño, D. (2010). Diseño y Construcción de un Digestor Anaerobio de Flujo Pistón que Trate los Residuos Generados en una Explotación Ganadera de la Localidad de Loja, Ecuador, Empleando Tecnologías Apropriadas. Loja, EC: Universidad Politécnica de Madrid.
- Bermúdez, J. (1988). La Digestión Anaerobia. Murcia, ES: Universidad de Murcia.
- Bolzonella, D., Battistoni, P., & Susini, C. (2006). Anaerobic codigestion of waste activated sludge and OFMSW: the experiences of Viareggio and Treviso plants (Italy). Verona, IT: University of Verona.
- Castells, X. (2012). Vías de Tratamiento y Valorización de Fangos de Depuradora. Madrid, ES: Ediciones Díaz de Santos.
- Chynoweth, D., Owens, J., & Legrandb, R. (2001). Renewable methane from anaerobic digestion of biomass. *Renewable Energy*, 1-8.
- da Silva, A., Bocio, A., Beltramini, T., Magosso, A., Domingo, J., & Segura, S. (2007). Heavy metals in untreated/treated urban effluent and sludge from a biological wastewater treatment plant. *Biological Wastewater Treatment Plant*, 483-489.
- Duan, N., Dong, B., Wu, B., & Dai, X. (2012). High-solid anaerobic digestion of sewage sludge under mesophilic conditions: Feasibility study. *Bioresource Technology*, 150-156.
- Frerot, A. (2009). La Unión Europea ante el reto de la escasez del agua. *Cuestiones sobre Europa*, 126.
- Fytily, D., & Zabaniotou, A. (2008). Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods - A review. *ScienceDirect*, 116-140.
- Gans, N., Mobini, S., & Zhang, X. (2007). Appendix E. Mass and Energy Balances at the Gaobeidian Wastewater Treatment Plant in Beijing, China. Lun, SE: Lund University.

- Gikas, P., & Tsoutsos, T. (2012). NEAR ZERO ENERGY WASTEWATER TREATMENT PLANTS FOR THE GREEK ISLANDS. Creta, GR: Technical University of Crete.
- Gutiérrez, M. (2014). Co-Digestión Anaerobia de Lodo de EDAR con Residuos Orgánicos de Diferente Naturaleza: Combinación de Técnicas Experimentales y Herramientas Matemáticas. San Sebastián: Universidad de Navarra.
- Herzog, T. (2009). World Greenhouse Gas Emissions in 2005. WRI Working Paper, 1-5.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2007). Biomasa - Digestores Anaerobios. Madrid, ES: IDAE.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de Gases de Efecto Invernadero (Vol. V). (S. Eggleston, L. Buendia, M. Kyoko, T. Ngara, & T. Kiyoto, Edits.) Japón: IGES.
- Karagiannidis, A., & Perkoulidis, G. (2009). A multi-criteria ranking of different technologies for the anaerobic digestion for energy recovery of the organic fraction of municipal solid wastes. *Bioresource Technology*, 2355-2360.
- Karthikeyan, O., & Visvanathan, C. (2013). Bio-energy recovery from high-solid organic substrates by dry anaerobic bio-conversion processes: a review. *Rev Environ Sci Biotechnol*, 257-284.
- Kim, S., Moon, S., Kim, K., & Yun, S. (2002). Pilot scale study on the ex situ electrokinetic removal of heavy metals from municipal wastewater sludges. *Water research*, 4765-4774.
- Kothari, R., Pandey, A., Kumar, S., Tyagi, V., & Tyagi, S. (2014). Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 174-195.
- Kusch, S., Schäfer, W., & Kranert, M. (2011). Dry Digestion of Organic Residues. *Integrated Waste Management*, I, 116-134.
- Lenntech BV. (17 de Junio de 2015). Tratamiento de lodos. Obtenido de LENNTECH: <http://www.lenntech.es/tratamiento-lodos-deshidratacion.htm>
- Ministerio de Industria, Energía y Turismo. (2005). Área del Biogás. En E. y. Ministerio de Industria, Plan de Energías Renovables (págs. 231-245). Madrid, ES: Ministerio de Industria, Energía y Turismo.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM). (2009). Caracterización de los lodos de depuradoras generados en España. Madrid, ES: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM). (2010). El Sector del Biogás Agroindustrial en España. Madrid, ES: MARM.

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2011). Manual de biogás. Santiago de Chile, CL: FAO.
- Reeh, U., & Møller, J. (2002). Evaluation of different biological waste treatment strategies. Hørsholm, DK: Danish Forest and Landscape Research Institute.
- Reith, J., Wijffels, R., & Barten, H. (2003). Bio-methane & Bio-hydrogen - Status and perspectives of biological methane and hydrogen production. Petten, NL: Smiet offset.
- Rulkens, W. (2008). Sewage Sludge as a Biomass Resource for the Production of Energy: Overview and Assesment of the Various Options. Wageningen, NL: Wageningen University.
- Schäfer, W., Lehto, M., & Teye, F. (2006). Dry Anaerobic Digestion of Organic residues on farm a feasibility Study. Vihti, FI: MTT Agrifood Research Finland.
- Shizas, L., & Bagley, D. (2004). Experimental Determination of Energy Content of Unknown Organics in Municipal Wastewater Streams. Toronto, CA: University of Toronto.
- Suárez, J., & Jácome, A. (2007). Espesamiento de Fangos de EDAR. Coruña, ES: Universidade da Coruña.
- Unión Europea (UE). (14 de 11 de 2012). Directiva 2012/27/UE de 12 de Octubre 2012 por la que se establecen medidas para el fomento de la eficiencia energética. Diario Oficial de la Unión Europea L 315, 10. Recuperado el 20 de 05 de 2015, de Agencia Estatal del Boletín Oficial del Estado: http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=DOUE-L-2012-82191
- United Kingdom The Parliamentary Office of Science and Technology. (2007). Energy and sewage. Postnote, 282.
- Weiland, P. (2006). State of the Art of Solid-Digestion - Recent Developments. Gülzower Fachgespräche, 22-38.
- Wett, B., Buchauer, K., & Fimml, C. (2007). Energy self-sufficiency as a feasible concept for wastewater treatment systems. Innsbruck, AT: University of Innsbruck.

ANEXOS

Anexo 1. Registros de fangos de depuradora

| Número | Tipo de fango | Caudal (m ³) | ST (kg/m ³) | Materia Volátil (%) | Materia seca (%) | SV (kg/m ³) |
|--------|------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|------------------|-------------------------|
| 1 | Fango Primario | 265617.00 | 3.20 | 87.80% | 0.00% | 2.81 |
| 2 | Fango Primario | 227897.00 | 2.80 | 87.10% | 0.00% | 2.44 |
| 3 | Fango Primario | 250708.00 | 3.20 | 86.00% | 0.00% | 2.75 |
| 4 | Fango Primario | 325231.00 | 2.70 | 82.50% | 0.00% | 2.23 |
| 5 | Fango Primario | 337636.00 | 2.80 | 82.40% | 0.00% | 2.31 |
| 6 | Fango Primario | 411507.00 | 2.30 | 81.40% | 0.00% | 1.87 |
| 7 | Fango Primario | 390199.00 | 2.10 | 81.90% | 0.00% | 1.72 |
| 8 | Fango Primario | 303241.00 | 2.20 | 75.50% | 0.00% | 1.66 |
| 9 | Fango Primario | 295295.00 | 2.80 | 76.10% | 0.00% | 2.13 |
| 10 | Fango Primario | 375751.00 | 2.30 | 83.10% | 0.00% | 1.91 |
| 11 | Fango Primario | 308829.00 | 2.40 | 85.40% | 0.00% | 2.05 |
| 12 | Fango Primario | 396435.00 | 2.30 | 86.20% | 0.00% | 1.98 |
| 13 | Fango Primario | 345769.00 | 2.60 | 87.90% | 0.00% | 2.29 |
| 14 | Fango Primario | 226929.00 | 2.50 | 87.10% | 0.00% | 2.18 |
| 15 | Fango Primario | 174773.00 | 2.60 | 84.50% | 0.00% | 2.20 |
| 16 | Fango Primario | 211344.00 | 3.50 | 86.00% | 0.00% | 3.01 |
| 17 | Fango Secundario | 177723.00 | 4.58 | 87.10% | 0.00% | 3.99 |
| 18 | Fango Secundario | 141704.00 | 4.16 | 84.70% | 0.00% | 3.52 |
| 19 | Fango Secundario | 159093.00 | 4.86 | 85.00% | 0.00% | 4.13 |
| 20 | Fango Secundario | 171074.00 | 5.04 | 84.40% | 0.00% | 4.25 |
| 21 | Fango Secundario | 174390.00 | 5.07 | 83.50% | 0.00% | 4.23 |
| 22 | Fango Secundario | 194351.00 | 4.56 | 82.90% | 0.00% | 3.78 |
| 23 | Fango Secundario | 207682.00 | 3.67 | 82.00% | 0.00% | 3.01 |
| 24 | Fango Secundario | 174503.00 | 3.48 | 77.50% | 0.00% | 2.70 |
| 25 | Fango Secundario | 229167.00 | 2.28 | 79.90% | 0.00% | 1.82 |
| 26 | Fango Secundario | 201725.00 | 4.07 | 82.90% | 0.00% | 3.37 |
| 27 | Fango Secundario | 188513.00 | 3.87 | 85.80% | 0.00% | 3.32 |
| 28 | Fango Secundario | 212808.00 | 4.00 | 85.50% | 0.00% | 3.42 |
| 29 | Fango Secundario | 210063.00 | 4.12 | 86.30% | 0.00% | 3.56 |
| 30 | Fango Secundario | 146827.00 | 3.46 | 84.70% | 0.00% | 2.93 |
| 31 | Fango Secundario | 122745.00 | 3.44 | 83.90% | 0.00% | 2.89 |
| 32 | Fango Secundario | 154184.00 | 4.60 | 84.30% | 0.00% | 3.88 |

Anexo 2. Registros de aguas de EDAR

| Nº | Caudal (m ³) | SST (mg/L) | DBO5 (mg/L) | DQO (mg/L) | Pt (mg/L) | NTK (mg/L) | NT (mg/L) |
|----------------|--------------------------|---------------|---------------|-------------|--------------|--------------|-----------|
| 1 | 4296.60 | 340.00 | 329.00 | 689.00 | 7.00 | 51.00 | 54.23 |
| 2 | 2758.00 | 459.00 | 428.00 | 861.00 | 7.60 | 57.00 | 72.18 |
| 3 | 3710.70 | 424.00 | 360.00 | 768.00 | 7.20 | 52.00 | 60.53 |
| 4 | 4431.00 | 335.00 | 301.00 | 672.00 | 7.00 | 47.00 | 47.17 |
| 5 | 4578.70 | 343.00 | 290.00 | 631.00 | 6.30 | 45.00 | 50.78 |
| 6 | 4617.00 | 344.00 | 308.00 | 609.00 | 6.80 | 45.00 | 55.26 |
| 7 | 4426.80 | 339.00 | 284.00 | 578.00 | 6.50 | 41.00 | 43.26 |
| 8 | 4355.50 | 287.00 | 225.00 | 500.00 | 5.50 | 38.00 | 36.28 |
| 9 | 4842.00 | 326.00 | 254.00 | 564.00 | 6.30 | 42.00 | 40.27 |
| 10 | 5034.40 | 309.00 | 309.00 | 577.00 | 5.80 | 47.00 | 38.84 |
| 11 | 4728.00 | 338.00 | 304.00 | 587.00 | 5.70 | 47.00 | 46.65 |
| 12 | 4133.50 | 354.00 | 373.00 | 738.00 | 6.80 | 62.00 | 54.94 |
| 13 | 4043.60 | 433.00 | 478.00 | 862.00 | 6.50 | 70.00 | 69.14 |
| 14 | 2265.50 | 376.00 | 451.00 | 796.00 | 7.20 | 84.00 | 74.66 |
| 15 | 3318.70 | 358.00 | 363.00 | 729.00 | 6.60 | 65.00 | 59.57 |
| 16 | 3733.90 | 385.00 | 432.00 | 713.00 | 6.70 | 63.00 | 69.39 |
| 4079.62 | 359.38 | 343.06 | 679.63 | 6.59 | 53.50 | 54.57 | |

Anexo 3. Registros de aguas depuradas

| Caudal (m ³) | SST (mg/L) | DBO5 (mg/L) | DQO (mg/L) | Pt (mg/L) | NTK (mg/L) | NT (mg/L) |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| 4296.60 | 29.00 | 26.00 | 87.00 | 1.14 | 38.00 | 40.13 |
| 2758.00 | 22.00 | 22.00 | 66.00 | 0.87 | 38.00 | 45.05 |
| 3710.70 | 23.00 | 21.00 | 67.00 | 1.08 | 36.00 | 38.23 |
| 4431.00 | 23.00 | 23.00 | 70.00 | 1.02 | 35.00 | 35.28 |
| 4578.70 | 25.00 | 18.00 | 72.00 | 1.03 | 35.00 | 36.85 |
| 4617.00 | 25.00 | 20.00 | 72.00 | 1.20 | 33.00 | 32.54 |
| 4426.80 | 22.00 | 19.00 | 67.00 | 1.00 | 31.00 | 29.31 |
| 4355.50 | 23.00 | 18.00 | 67.00 | 1.10 | 28.00 | 27.29 |
| 4842.00 | 24.00 | 18.00 | 62.00 | 0.90 | 30.00 | 26.13 |
| 5034.40 | 18.00 | 14.00 | 59.00 | 0.70 | 32.00 | 30.11 |
| 4728.00 | 17.00 | 14.00 | 56.00 | 0.55 | 28.00 | 32.24 |
| 4133.50 | 19.00 | 19.00 | 62.00 | 0.64 | 41.00 | 36.17 |
| 4043.60 | 35.00 | 33.00 | 94.00 | 0.99 | 50.00 | 40.52 |
| 2265.50 | 20.00 | 21.00 | 71.00 | 0.70 | 58.00 | 46.86 |
| 3318.70 | 23.00 | 22.00 | 72.00 | 1.27 | 43.00 | 30.78 |
| 3733.90 | 20.00 | 23.00 | 69.00 | 1.15 | 41.00 | 38.08 |
| 4079.62 | 23.00 | 20.69 | 69.56 | 0.96 | 37.31 | 35.35 |

Anexo 4. Registros de consumo energético

| Fecha | Consumo Eléctrico (kWh) | | | | |
|---------------------------|-------------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | EDAR | Bombeo | Total Planta | Producción turbina | Total externo |
| ene-14 | 2061000.00 | 49100.00 | 2110100.00 | 291800.00 | 1818300.00 |
| feb-14 | 1665000.00 | 36300.00 | 1701300.00 | 199600.00 | 1501700.00 |
| mar-14 | 1952000.00 | 54000.00 | 2006000.00 | 285500.00 | 1720500.00 |
| abr-14 | 1935000.00 | 63700.00 | 1998700.00 | 326200.00 | 1672500.00 |
| may-14 | 1950000.00 | 61600.00 | 2011600.00 | 387500.00 | 1624100.00 |
| jun-14 | 1949000.00 | 60500.00 | 2009500.00 | 338800.00 | 1670700.00 |
| jul-14 | 1950000.00 | 60200.00 | 2010200.00 | 295600.00 | 1714600.00 |
| ago-14 | 1949000.00 | 55200.00 | 2004200.00 | 173500.00 | 1830700.00 |
| sep-14 | 2005000.00 | 58600.00 | 2063600.00 | 241300.00 | 1822300.00 |
| oct-14 | 1989000.00 | 62000.00 | 2051000.00 | 330300.00 | 1720700.00 |
| nov-14 | 1763000.00 | 63900.00 | 1826900.00 | 252000.00 | 1574900.00 |
| dic-14 | 1763000.00 | 64500.00 | 1827500.00 | 243900.00 | 1583600.00 |
| Total | 22931000.00 | 689600.00 | 23620600.00 | 3366000.00 | 20254600.00 |
| Promedio mensual | 1910916.67 | 57466.67 | 1968383.33 | 280500.00 | 1687883.33 |
| Porcentaje mensual | 97% | 3% | 100% | 14% | 86% |