



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

**Estudio de viabilidad de la
implementación de hidrólisis térmica
intermedia en la línea de lodos de una
EDAR**

Autor:

de la Cuesta Pérez, Rebeca

Tutores:

Pérez Elvira, Sara Isabel.

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

Díaz Villalobos, Israel.

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

Valladolid, Marzo 2021.

Resumen y Palabras clave

Este Trabajo de Fin de Grado se centra en el estudio de la viabilidad de la implementación de una hidrólisis térmica como tratamiento intermedio entre dos etapas de digestión anaerobia en la línea de lodos de la EDAR de Valladolid con el fin de valorizar un residuo inevitable: los lodos de depuración.

Para estudiar la viabilidad del proceso de hidrólisis térmica intermedia se llevaron a cabo diferentes experimentos de hidrólisis en laboratorio previamente diseñados y optimizados y se compararon con el proceso convencional de tratamiento de lodos.

Se concluyó que el proceso con hidrólisis térmica, además de ser viable tanto técnica como económica y medioambientalmente, maximizaba la producción de biogás además de la eliminación de sólidos volátiles minimizándose la producción del residuo final: el lodo deshidratado.

Palabras clave: Tratamiento de lodos EDAR; hidrólisis térmica; diseño de experimentos; optimización; biogás.

Abstract and keywords

This Final Degree Project is based on the study of the viability of the implementation of a thermal hydrolysis as an intermediate treatment between two stages of anaerobic digestion in the sludge line of the Valladolid WWTP in order to valorize an unavoidable waste: sewage sludge.

To study the feasibility of the intermediate thermal hydrolysis process, different previously designed and optimized laboratory hydrolysis experiments were carried out and compared with the conventional sludge treatment process.

It was determined that the thermal hydrolysis process, besides being technically, economically and environmentally viable, maximized the production of biogas in addition to the elimination of volatile solids and minimized the production of the final residue: the dehydrated sludge.

Keywords: WWTP sludge treatment; thermal hydrolysis; experimental design; optimization; biogas; biogas

ÍNDICE

1. Introducción	7
1.1 Estación depuradora de aguas residuales (EDAR) de Valladolid.....	7
1.1.1. Características de las aguas residuales	9
1.1.2. Línea de aguas.....	16
1.1.3. Línea de lodos	19
1.1.4. Línea de gas.....	20
1.2 Tratamiento de los lodos de EDAR.....	21
1.2.1. Alternativas	21
1.2.2. Digestión anaerobia	25
1.3 Optimización del tratamiento de lodos: Pretratamientos.....	30
1.3.1. Alternativas de pretratamiento	31
1.3.2. Pretratamiento térmico seleccionado para el estudio: Hidrólisis térmica	41
1.3.3. Hidrólisis térmica intermedia.....	42
2. Objetivos	45
3. Metodología.....	47
3.1 Lodos y caracterización	47
3.1.1. Muestreo de lodos.....	47
3.1.2. Métodos analíticos.....	49
3.2 Plantas piloto.....	49
3.2.1. Descripción del proceso.....	49
3.2.2. Descripción de la planta de hidrólisis para evaluación experimental.....	50
3.2.3. Ensayos BMP	52
3.3 Diseño de experimentos.....	53
3.3.1. Descripción de los parámetros a evaluar	53
3.3.2. Selección del diseño.....	54
3.4 Cálculos	55
3.4.1. Cálculos relativos al BMP	55
3.4.2. Cálculos relativos a la hidrólisis térmica: eliminación de sólidos.....	58
3.5 Bases de cálculo para los balances de materia y energía.	59
4. Resultados y discusión	61

4.1	Resultados experimentales	61
4.2	Resultados de cálculos relativos al BMP	61
4.3	Resultados de cálculos relativos a la HT.....	62
4.4	Optimización experimental de las condiciones de operación de HTI..	62
4.4.1.	Optimización	62
4.4.2.	Análisis del diseño	63
4.5	Análisis del proceso de tratamiento de lodos	70
4.5.1.	Balances de materia y energía al proceso convencional de digestión anaerobia (CDA)	70
4.5.2.	Balances de materia y energía al proceso con Hidrólisis Térmica Intermedia (HTI)	78
4.5.3.	Balances de materia y energía al proceso sin hidrólisis térmica.....	91
5.	<i>Viabilidad del proceso.....</i>	97
5.1	Viabilidad técnica	97
5.2	Viabilidad económica.....	101
5.3	Viabilidad medioambiental y legal	102
6.	<i>Conclusiones.....</i>	105
7.	<i>Bibliografía.....</i>	113
8.	<i>Anexos</i>	119
8.1	ANEXO I: Datos experimentales	119
8.2	ANEXO II: Resultados producción y productividad de metano.....	122
8.3	ANEXO III: Resultados producción y productividad de biogás.....	125
8.4	ANEXO IV: Experimentos Taguchi.....	128

1. Introducción

1.1 Estación depuradora de aguas residuales (EDAR) de Valladolid

Las actividades humanas, tienen como consecuencia inevitable la generación de aguas residuales. Estas aguas residuales pueden proceder tanto de actividades domésticas como de actividades industriales o de aguas pluviales. Por tanto, el agua residual procedente de núcleos urbanos es necesario tratarlo con el objetivo de devolverlo al medio natural en el mejor estado posible y dentro de los parámetros cada vez más exigentes en materia de sostenibilidad.

El objetivo de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) es realizar los mismos procesos de autodepuración que se producen naturalmente en el río, pero de un modo más rápido y en menor espacio utilizando procesos de tipo físico, químico y biológico. En estas instalaciones se consigue, de forma intensiva, la eliminación de residuos, aceites, grasas y sólidos suspendidos que enturbiarían el agua, perjudicando los procesos de fotosíntesis y la respiración de los seres vivos del río, así como la reducción drástica de la concentración de materia orgánica, que consumiría el oxígeno disuelto en el agua, fundamental para el desarrollo de la vida acuática. También se eliminan compuestos ricos en amoníaco, fósforo y nitrógeno que servirían de nutrientes plantas acuáticas como las microalgas, cuya proliferación disminuiría la biodiversidad en el río y en su entorno.[1] [2][3]

El tratamiento de aguas residuales urbanas engloba operaciones y procesos unitarios de naturaleza física, química y biológica, entre los que se diferencian tres tipos de tratamiento:

- Tratamiento primario: operaciones físicas tales como sedimentación y desbaste para la eliminación de sólidos sedimentables y flotables.
- Tratamiento secundario: procesos biológicos y químicos para la eliminación de materia orgánica.
- Tratamiento terciario: combinaciones de procesos físicos y operaciones biológicas y químicas para eliminar componentes como fósforo y nitrógeno presentes en las aguas residuales.

En la actualidad, los procesos y operaciones realizados para el tratamiento de las aguas residuales están siendo sometidos a una continua investigación, donde se han llevado a cabo multitud de mejoras en los métodos convencionales, así como el desarrollo de técnicas de tratamiento alternativas. Este intensivo proceso de investigación y desarrollo se debe a motivos como la

creciente exigencia en controles de vertido de cara a la mejora ambiental de los cursos del agua; la necesidad de conservar y ahorrar energía, realizando un proceso donde prevalezca la sostenibilidad, motivo principal del caso a estudio en este TFG, ya que cada vez se presta más atención a la elección de procesos donde se conserve la energía y recursos de los que se dispone; y por último, la proliferación de compuestos orgánicos presentes en el agua que no son susceptibles de ser tratados mediante los métodos convencionales.[4]

En el año 1999 se puso en marcha la EDAR de Valladolid, con el fin de completar todas las fases del ciclo urbano del agua en la ciudad. Su diseño se realizó teniendo en cuenta las previsiones de crecimiento de la ciudad, permitiendo atender las demandas de una población equivalente de 570.000 considerando que cada habitante genera 60 g de DBO por día. En concreto, la EDAR de Valladolid tiene una capacidad máxima que llega a alcanzar los 3,05 m³/s. La estación depuradora está situada en el Camino Viejo de Simancas, 239, 47008, Valladolid. La situación es óptima debido a la lejanía del centro de la ciudad para evitar olores, y además es próxima al Río Pisuerga, necesario para vertido del agua ya tratada. [2] [5]

En la estación depuradora de Valladolid se divide el proceso de depuración en varias partes, donde encontraremos equipos como: sedimentadores, reactores biológicos, digestores para el lodo que se genera en el tratamiento, gasómetros de membrana para el almacenamiento de biogás, etc. Todos estos equipos, al ser una zona urbana, están prácticamente enterrados ocupando poco espacio visual.



Ilustración 1. EDAR de Valladolid

En el tratamiento de depuración se diferencian tres líneas: línea de aguas, línea de lodos y línea de gases, que serán estudiadas en profundidad más adelante en este trabajo.[6]

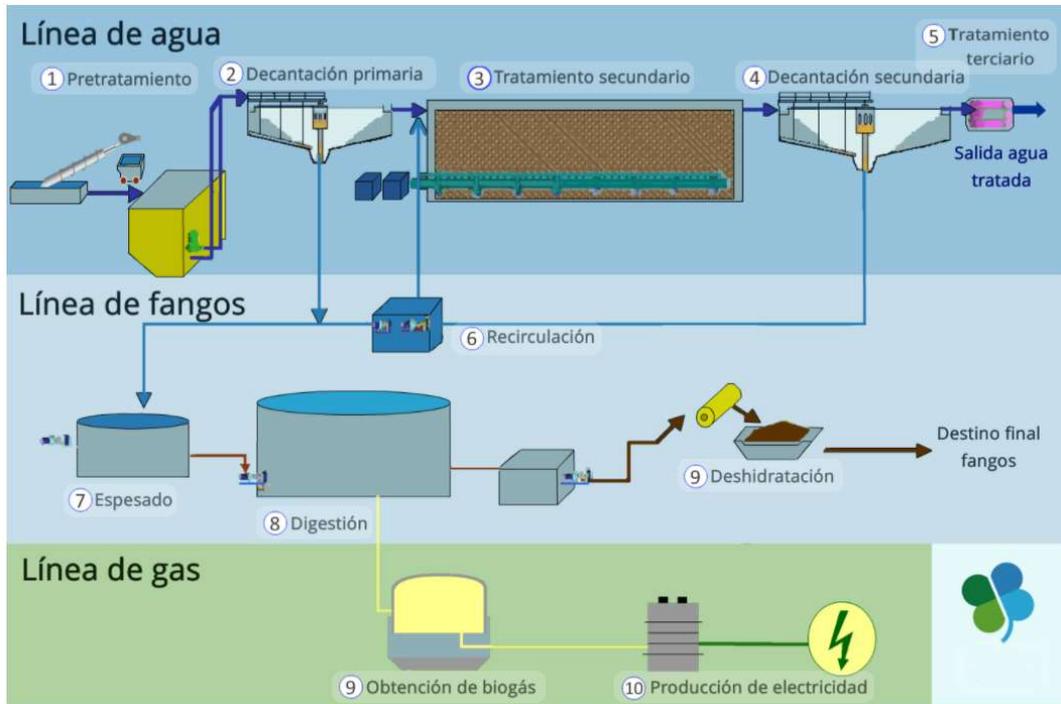


Ilustración 2. Esquema general de una estación depuradora.[7]

1.1.1. Características de las aguas residuales

Para el diseño de los sistemas de recogida, tratamiento y vertido de las aguas residuales urbanas, es necesario conocer el caudal y las características de las mismas. Para ello se utilizan tanto métodos de análisis cuantitativos, para conocer la composición química del agua, como métodos cualitativos, para la caracterización física y biológica de esta.

El caudal a tratar, calculado partiendo del número de habitantes de la zona y su consumo medio de agua por día, además de una duración estimada de vida de la planta, es el parámetro principal para el diseño y dimensionamiento de la estación depuradora, mientras que las características de las aguas servirán para determinar el tipo de tratamiento (físico, químico o biológico) que se realizará.

A continuación, se resumen los diferentes parámetros más importantes para poder caracterizar las aguas residuales:

1.1.1.1. Parámetros físicos

Parámetros físicos: Sólidos

ST (Sólidos totales): Total de la materia obtenida como residuo después de evaporar el agua a una temperatura entre 103°C y 105°C. Es la suma de los sólidos fijos (SF) y los sólidos volátiles (SV).

SST (sólidos suspendidos o materia en suspensión MES): Materia obtenida como residuo después de evaporar el agua a una temperatura entre 103°C y 105°C con diámetros superiores a 1 µm. Estos sólidos suspendidos están formados tanto por materia orgánica (aproximadamente un 75%) como inorgánica. Al calentar esta materia a una temperatura de 550°C±50°C se produce una volatilización de la parte orgánica, también llamados **sólidos suspendidos volátiles (SSV)**, que se oxida y desaparece en forma de gas, quedando en como cenizas lo que constituiría la parte inorgánica de los sólidos suspendidos, que son los **sólidos suspendidos fijos**.

Sólidos filtrables: Materia obtenida como residuo después de evaporar el agua a una temperatura entre 103°C y 105°C con diámetros inferiores a 1 µm. Aproximadamente el 40% de estos sólidos son materia orgánica. Al calentar esta materia a una temperatura de 550°C±50°C se produce una volatilización de la parte orgánica, también llamados **sólidos filtrables volátiles**, quedando en como la parte inorgánica de los sólidos filtrables, que son los **sólidos filtrables fijos**.

SV (sólidos volátiles): Conjunto de los sólidos filtrables volátiles y los sólidos suspendidos volátiles. La concentración de SV se puede aproximar a la de SSV cuando prácticamente no haya materia orgánica disuelta, es decir esté toda en suspensión. Se corresponde con la parte orgánica de los sólidos totales.

SF (sólidos fijos): Conjunto de los sólidos filtrables fijos y los sólidos suspendidos fijos. Se corresponde con la parte inorgánica de los sólidos totales.

Sólidos sedimentables: Parte de los sólidos suspendidos que sedimenta en el fondo de un recipiente de forma cónica (cono de Imhoff) en el transcurso de una hora. Estos sólidos representan una medida aproximada de la cantidad de fango que se obtendrá en la decantación primaria del agua residual.

Parámetros físicos: Temperatura

El conocimiento de la temperatura a la que el agua llega a la planta es necesario para determinar el tipo de tratamiento que se realizará, además de ser esta un factor de gran influencia sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción.

Otro aspecto importante es la temperatura a la que se produce el vertido de las aguas ya tratadas, debido a que una temperatura del agua de 10-15°C superior a su valor medio normal es un agua “térmicamente contaminada” e influye en la calidad de vida acuática ya que disminuye la solubilidad del oxígeno, además también sería de influencia en la utilización del agua tratada para determinados usos útiles.

Parámetros físicos:

Otros parámetros físicos de caracterización del agua son el olor y color, la densidad y la turbidez del agua.

1.1.1.2. Parámetros químicos

Parámetros químicos:

Alcalinidad: Medida de la capacidad de amortiguar las variaciones de pH producidos por la adición de ácidos, es decir, de la capacidad tampón o capacidad para neutralizar ácidos que tiene el agua. Esta característica está provocada por la presencia de hidróxido, carbonatos y bicarbonatos de elementos como magnesio, calcio, potasio o sodio en las aguas residuales.

pH: Es la concentración del ion hidrógeno H^+ presente en el agua y determina el carácter ácido o básico de esta. Es una característica fundamental para el desarrollo de la vida acuática y para su adecuada proliferación debe estar entre el 6,5 y 8,5.

Conductividad: Capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica. Es función de la concentración de iones presentes en el agua y los más habituales suelen ser cloruros, nitratos, fosfatos, sulfatos, sodio, magnesio y calcio. Este parámetro es medido generalmente en siemens por centímetro y depende de factores como la temperatura, el tipo de sales presentes y los gases disueltos.

Parámetros químicos: materia orgánica

DBO₅ (Demanda biológica o bioquímica de oxígeno): DBO a 5 días. Cantidad de oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación de la materia orgánica. Es decir, este parámetro indica la concentración, en mg O₂/L de materia orgánica biodegradable presente en el agua residual. 5 días representa el tiempo de duración del ensayo de medición de este parámetro, el cual se realiza a una temperatura de 20°C y donde se llega a oxidar entre el 60 y 70% de la materia orgánica.

DQO (Demanda química de oxígeno): Cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica presente en el agua utilizando agentes químicos

oxidantes. Se mide en mg O₂/L. Al haber más componentes que se oxidan de forma química que biológica, la DQO es mayor que la DBO.

La relación DBO₅/DQO es un parámetro interesante, ya que se puede estimar la DQO del agua en un tiempo de aproximadamente 3 horas, frente a los 5 días de duración del ensayo de la DBO, además, este parámetro indica la biodegradabilidad de las aguas residuales urbanas.

- DBO₅/DQO > 0,4 → biodegradable
- 0,2 < DBO₅/DQO < 0,4 → biodegradable
- DBO₅/DQO < 0,2 → no es biodegradable

COT (Carbono orgánico total): Parámetro que mide la concentración de carbono del agua residual en mg C/L. Su ensayo tiene un periodo de duración muy corto, por lo que su uso se está extendiendo cada vez más para la medición de materia orgánica presente en el agua. El carbono es un nutriente esencial para la vida de los seres vivos y su vertido al medio natural puede favorecer el crecimiento de vida acuática no deseada.

Parámetros químicos: nutrientes

Nitrógeno: Nutriente esencial para el crecimiento de los seres vivos. Se considera como contaminante su presencia en las aguas en grandes cantidades ya que su vertido al medio acuático puede favorecer la proliferación de vida acuática no deseada, como algas cuya descomposición hace que la materia orgánica reaccione con el oxígeno disuelto en el agua consumiéndolo. Aun así, sin nitrógeno suficiente no sería posible el tratamiento del agua residual y será necesario añadirlo. Hay que tener en cuenta que el nitrógeno es un componente básico para la síntesis de proteínas, por lo que será preciso conocer la cantidad del mismo en las aguas para así poder valorar la posibilidad de tratamiento biológico del agua residual.

Podemos encontrar el nitrógeno total presente en las aguas de las distintas formas:

- Nitrógeno orgánico: La primera forma en la que encontramos el nitrógeno en las aguas residuales frescas es como urea o como materia orgánica proteínica que rápidamente, por descomposición bacteriana, se transforman en nitrógeno amoniacal.
- Nitrógeno amoniacal (NH₄⁺): El nitrógeno amoniacal se encuentra en forma de solución acuosa, siguiendo la ecuación de equilibrio $NH_3 + H_2O \leftrightarrow NH_4^+ + OH^-$, dependiendo del pH de la solución.

- pH altos (pH>7): Según el principio de Le Chatelier, el equilibrio se desplaza a la izquierda, por lo que encontramos en nitrógeno de la forma NH_3 .
- pH bajos (pH<7): Según el principio de Le Chatelier, el equilibrio se desplaza hacia la derecha, encontrando el nitrógeno como ión amonio (NH_4^+).
- Nitritos (NO_2): Los nitritos son compuestos muy tóxicos para las especies acuáticas. Se presentan en el agua residual en concentraciones muy bajas, menores a 1 mg/L ya que es una forma del nitrógeno muy inestable y se oxida rápidamente a nitratos. Para acelerar esta oxidación y conseguir una rápida desinfección de las aguas se adicionan cloros.
- Nitratos (NO_3): Es la forma más oxidada del nitrógeno en las aguas residuales, por lo que es un indicador de que el residuo se ha estabilizado con respecto a la demanda de oxígeno.

Fósforo: Al igual que el nitrógeno, el fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de algas y otros organismos biológicos. Existe la necesidad de controlar el fósforo presente en el vertido de aguas tratadas ya que elevadas concentraciones de este elemento provocan una nociva eutrofización en las aguas superficiales. El fósforo total presente en las aguas residuales también lo encontramos de diferentes formas, apareciendo principalmente como fosfatos orgánicos, ortofosfatos (como por ejemplo PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , H_3PO_4) y polifosfatos.

Parámetros químicos: gases

Tanto en las aguas residuales frescas como durante su tratamiento y en el agua ya tratada, hay tener en cuenta la presencia de gases como N_2 , CO_2 , y O_2 presentes comúnmente en la atmósfera que se encuentran en todas las aguas en contacto con ésta; H_2S , NH_3 y CH_4 procedentes de la descomposición de la materia orgánica presente en las aguas residuales. También es importante prestar atención a gases como Cl_2 y O_3 derivados del tratamiento de olores o a los óxidos de azufre y nitrógeno desprendidos en procesos de combustión.

Oxígeno disuelto (O_2): Es la concentración de oxígeno presente en el agua. Al ser un elemento necesario para el desarrollo de procesos que se llevan a cabo en el medio acuático e indispensable para el metabolismo de los seres vivos, la concentración de oxígeno disuelto, medida tomando como referencia el 100% de saturación de oxígeno en el aire, la concentración de oxígeno disuelto en el agua es un indicador de la capacidad de esa agua de mantener la vida acuática.

La solubilidad en agua del oxígeno es función de la presión parcial de este elemento sobre el agua, de la temperatura siguiendo una relación inversamente proporcional donde un aumento de temperatura conlleva una disminución de la solubilidad del gas, de la presión atmosférica y a su vez de la altitud con respecto al mar. También de características del agua como su salinidad, siendo mayor la concentración de oxígeno disuelto en aguas dulces que en saladas.

Para su estimación se emplea la ley de Henry que enuncia que a una temperatura dada, la cantidad de gas disuelta en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial que ejerce ese gas sobre el líquido.

Sulfuro de Hidrógeno (H₂S): Gas incoloro, inflamable y de olor característico culpable generalmente de los problemas de olores en el tratamiento de las aguas residuales. Se forma a partir de la descomposición bacteriana de la materia orgánica que contiene azufre y su formación queda inhibida bajo la presencia de grandes concentraciones de oxígeno.

Metano (CH₄): El metano es un hidrocarburo combustible de gran contenido energético. Es el principal subproducto de la descomposición anaerobia de la materia orgánica. Debido a la concentración de oxígeno en las aguas residuales, la presencia de metano es mínima ya que incluso pequeñas cantidades de oxígeno resultan tóxicas para los microorganismos productores de metano; sin embargo, se puede llegar a producir metano en depósitos acumulados en el fondo donde la materia orgánica se descompone de forma anaerobia.

Su elevado contenido energético hace que se busque la maximización de su productividad en los procesos donde se desprende este gas, como la digestión anaerobia realizada para la estabilización de fangos de las aguas residuales donde se produce metano como principal subproducto. Más adelante, en este trabajo, la digestión anaerobia de las aguas residuales se desarrollará más detalladamente haciendo hincapié en la optimización de la productividad de este combustible.

Parámetros químicos: Metales pesados

Metales pesados como manganeso (Mn), níquel (Ni), cromo (Cr), plomo (Pb), cadmio (Cd), zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe), mercurio (Hg) y arsénico (As), son añadidos al agua durante ciertas actividades industriales. Aunque presencia en las aguas residuales se limita a concentraciones muy bajas, al nivel de traza y algunos son necesarios para el correcto crecimiento de ciertos seres vivos acuáticos, su presencia en concentraciones excesivas presenta problemas de

toxicidad siendo además elementos no biodegradables que llegan a acumularse en la cadena trófica, por lo que deben ser eliminados.

[1], [4], [8]

Los valores típicos de los parámetros físicos y químicos de entrada y salida del agua residual urbana en la EDAR de Valladolid, junto a los valores límite autorizados se recogen en la siguiente imagen:

PARÁMETRO	Unidades	ENTRADA	SALIDA	Valores límite autorizados
pH	ud pH	7,7	7,6	5,5 – 9,5
MES	mg/l	302	3	35
DBO5	mg/l O ₂	307	7	25
DQO	mg/l O ₂	526	29	125
Nitrógeno amoniacal	mg/l N	21	1	10
Nitrógeno total	mg/l N	41	10	10
Fósforo total	mg/l P	5,9	0,7	1
Alcalinidad	mg/l CaCO ₃	307	197	-
Conductividad	mS/cm	1025	888	-

Ilustración 3. Características químicas del agua de la EDAR de Valladolid (2018) [2]

1.1.1.3. Parámetros biológicos

Parámetros biológicos: Microorganismos

Para tener un adecuado conocimiento de la composición de las aguas residuales es necesario conocer la presencia de grupos de microorganismos como: [2][4]

- **Bacterias:** Microorganismos encargados de realizar procesos de degradación y estabilización de la materia orgánica.
- **Hongos:** Para muchos hongos la materia orgánica muerta es su fuente de alimentación. Junto con las bacterias son los encargados de la descomposición del carbono y sin ellos la degradación de la materia orgánica se interrumpiría rápidamente llegando esta a acumularse.
- **Algas:** Se ha de tener en cuenta este grupo debido a que el agua residual debe tratarse para que los efluentes vertidos al medio acuático no favorezcan el crecimiento de algas produciendo una eutrofización nociva.
- **Protozoos:** Son de gran importancia, ya que al alimentarse de bacterias y otros microorganismos, tienen la capacidad de mantener el equilibrio natural entre los diferentes tipos de microorganismos. Ciertos protozoos también son patógenos, por lo que hay que controlar su presencia en las aguas.

- **Virus:** Los virus excretados por la población de un área urbana pueden sobrevivir hasta 41 días a una temperatura de 20°C en las aguas residuales. En la situación de pandemia actual, Valladolid pertenece al Sistema de alerta temprana para la detección del COVID-19.

Ya que experiencias previas han demostrado que el control de estos microorganismos en las aguas residuales puede usarse como un indicador epidemiológico para la detección de la circulación del virus en la población, Aquavall colabora tomando muestras en la EDAR de Valladolid para detectar la presencia de trazas de este virus en las aguas residuales de este núcleo urbano como red de alerta de posible rebrote de COVID-19.

A continuación, podemos ver los datos de la presencia de trazas de material genético de SARS-CoV-2 en las aguas residuales de la EDAR de Valladolid, coincidiendo los valores positivos con las épocas de rebrotes en la población de la ciudad.

RECOGIDA DE LA MUESTRA	AGUA DE ENTRADA	AGUA DE SALIDA
19/07/2020	Negativo	-
26/07/2020	Positivo	Negativo
09/08/2020	Positivo	Negativo
16/08/2020	Positivo	-
23/08/2020	Positivo	Negativo
30/08/2020	Positivo	-
06/09/2020	Positivo	Negativo

Ilustración 4. Informe de la presencia de trazas de COVID-19 en las aguas residuales de la EDAR de Valladolid [2]

1.1.2. Línea de aguas

La línea de aguas de la estación es la secuencia de tratamientos que se dan al agua durante el proceso de depuración en la EDAR de Valladolid y se llega a conseguir una eliminación del 90% de DBO, el 70% de Nitrógeno, el 80% de Fósforo y el 90% de sólidos en suspensión.

El agua se recoge en dos colectores a lo largo de ambos lados del Río Pisuerga y se lleva hasta la depuradora a través de una red de alcantarillado de 771 km. El agua tarda en recorrer la línea aproximadamente de 15 horas. Antes de la entrada del agua a los procesos de depuración es necesario realizar una primera operación de separación de los sólidos más grandes que causan

problemas, ya que el agua que entra a la estación depuradora tiene una gran cantidad de sólidos de diferentes tamaños. También se busca que a la planta entre un caudal y una concentración prácticamente constantes. Para ello se implementó un sistema compuesto por un **pozo de bombeo**, donde el agua del colector llega y mediante siete bombas sumergidas elevan la cota del agua 19 metros para que pueda entrar a la depuradora. Este pozo consta también de una cuchara bivalva que recoge los sólidos más gruesos y los separa para que sean llevados al vertedero. Una vez el agua es elevada, para regular el caudal se encuentran unos “anillos” o canales donde la parte del caudal de agua que va por el primer anillo es destinada a la planta para proceder al tratamiento. Cuando el caudal de agua aumenta superando el caudal máximo admisible de entrada a la planta (3,05 m³/s), rebosa al segundo anillo destinándose al **tanque de tormentas**. El tanque tiene una capacidad de almacenamiento de 7500 m³ y su función es homogeneizar, por lo que cuenta con bombas eectoras y aceleradores de corriente para que el agua almacenada este en circulación hasta que se incorpore lentamente a la línea de tratamiento. El tercer canal, será llenado si el agua sigue rebosando y este agua será vertida al río.

Los tratamientos englobados en la línea de aguas son: pretratamiento (pozo intermedio, desbaste, desengrasado/desarenado), tratamiento primario (sedimentación primaria), tratamiento secundario (reactor biológico).

PRETRATAMIENTO

El pretratamiento comienza en un **pozo intermedio**, donde seis bombas centrífugas elevan la cota del agua para que las siguientes operaciones puedan transcurrir por gravedad. El agua es sometida a una primera operación de **desbaste** para eliminar sólidos de pequeño y mediano tamaño. El caudal es dividido en cinco canales paralelos que pasan, primero por unas rejillas de eliminación de sólidos de 50 mm (desbaste de gruesos), y luego por tamices que retienen sólidos más pequeños, de unos 3 mm (desbaste de finos). Todos estos residuos de sólidos retenidos, compactados para reducir su volumen, sometidos a tratamientos de olores y depositados en contenedores para ser destinados al vertedero.

Una vez se han eliminado los residuos sólidos más grandes, en el agua únicamente se encuentran arenas, grasas, materia orgánica, etc. Se procede a una etapa de **desengrasado/desarenado** que tiene lugar en cuatro canales paralelos, con un volumen unitario de 802 m³, donde por la parte inferior se insufla aire para favorecer la flotación. Está equipado con un carro de translación, un sistema de rascado que se mueve por la parte superior recogiendo arenas y por la parte inferior arrastrando las grasas hasta un

sistema de concentración para eliminarlas. Todos estos residuos eliminados son llevados al vertedero.

Después del proceso de pretratamiento, el agua en tratamiento se compone fundamentalmente de materia orgánica pesada y materia orgánica disuelta.

TRATAMIENTO PRIMARIO

El objetivo del tratamiento primario es eliminar la materia sedimentable y flotante. Para ello, el agua es sometida a un proceso de decantación o sedimentación, llevado a cabo en cuatro **sedimentadores primarios** donde la materia orgánica pesada es eliminada. Estos sedimentadores están formados por lamelas, una especie de tubos inclinados 60° que mantienen la sedimentación reduciendo la superficie necesaria para ésta, por lo que estos equipos ocupan 1/5 de la superficie convencional. Se tienen también sistema de rascado en la parte inferior y superior. El agua que rebosa y se recoge, únicamente con materia orgánica disuelta, se lleva a la siguiente parte del tratamiento mediante cuatro canales paralelos entre los sedimentadores hasta los reactores biológicos (cuatro tanques de 18 000 m³). El fango eliminado es empujado por el sistema de rascado del fondo de los sedimentadores para proceder a su purga.

TRATAMIENTO SECUNDARIO

En los **reactores biológicos** encontramos diferentes zonas. Es el llamado proceso A₂O en el que hay una zona de tratamiento anaerobio, una parte de tratamiento anóxico y la más importante, la del tratamiento aerobio donde se introduce una cantidad de aire de 90 000 m³/hora y donde se eliminará la materia orgánica. Para cada parte del proceso se cuenta con tres cámaras. El licor mezcla procedente del tratamiento biológico se lleva a un canal común donde luego se conduce hacia los sedimentadores secundarios.

El siguiente proceso es una **sedimentación secundaria** compuesta por ocho decantadores de 45 m de diámetro en la que se produce la separación de los sólidos presentes en el licor mezcla. Cuenta con un sistema de extracción continua de fango, que será conducido hacia el depósito de fangos biológicos. Una parte del agua clarificada es recirculada a la cabeza de los reactores biológicos donde se mezcla con el fango primario mientras que la otra parte se recoge, circula por un canal con diferentes sistemas de control donde se miden los parámetros y se comprueba que estén dentro de los límites legales, y es vertida al Río Pisuerga.

1.1.3. Línea de lodos

Los lodos obtenidos como residuo del tratamiento de las aguas residuales son un medio multifásico donde se concentra la contaminación eliminada de las aguas tratadas. Están constituidos en su gran mayoría por agregados microbianos, filamentosos, cepas bacterianas, partículas orgánicas e inorgánicas, polímeros extracelulares (EPS) y una gran cantidad de agua. Se caracterizan por ser de difícil concentración y manipulación debido a su gran caudal, por tanto, en la línea de lodos se procederá al tratamiento de éstos con el fin de reducir su volumen y estabilizarlos. [4][9]

ESPESAMIENTO

Antes de comenzar la etapa de espesado de los fangos es necesario acondicionarlos. Los lodos obtenidos de la decantación primaria, provenientes únicamente de operaciones físicas son tamizados para eliminar partículas que puedan producir problemas en las siguientes etapas de tratamiento y mezclados con los lodos secundarios provenientes de tratamientos biológicos, son mezclados para dar lugar al **fango mixto**. El fango mixto es conducido mediante cinco bombas hasta cinco centrífugas donde se realizará su espesamiento. El agua separada durante el proceso de centrifugación se recircula a la línea de aguas, obteniendo así el **lodo espesado** que será conducido hasta un depósito para ser bombeado a los digestores donde se realizará la digestión anaerobia. La capacidad de este proceso para reducir el volumen del lodo tendrá ventajas como son: la necesidad de menor volumen de equipos de tratamiento y de menor energía.

ESTABILIZACIÓN

El proceso de estabilización en la EDAR de Valladolid es llevado a cabo mediante una **digestión anaerobia** en tres grandes digestores primarios de 6000 m³ a una temperatura mesófila (35-38°C) con tiempos de retención de 24 días. El fango digerido primario se conduce a dos digestores secundarios que funcionan como depósitos para regular el caudal de lodo enviado a la siguiente etapa del tratamiento.

El proceso de digestión anaerobia implica la descomposición microbiana de materia orgánica compleja en ausencia de oxígeno en un producto rico en energía llamado "**biogás**" compuesto principalmente por una mezcla de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), y en menor cantidad H₂S, amoníaco y contenido de humedad, al tiempo que se destruyen los patógenos y se eliminan los olores. Este proceso comprende una serie de etapas (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis) en la que participan diferentes grupos de microbios. [9]. Esta técnica tiene un porcentaje de eliminación de

sólidos suspendidos volátiles del 45-50%. Se ha de destacar, que la energía generada gracias al biogás producido en los digestores satisface completamente la demanda de energía de la planta. El lodo digerido es bombeado para someterse a un proceso de deshidratación.

Esta etapa del tratamiento del lodo será de gran importancia en el desarrollo de este trabajo, ya que la investigación se centrará en la optimización de la producción de biogás y la eliminación de sólidos volátiles de los lodos de la estación depuradora de aguas residuales de Valladolid. Por tanto, el proceso de digestión anaerobia será explicado detalladamente en el apartado 1.2.2 Digestión anaerobia.

DESHIDRATACIÓN

La etapa de deshidratación del lodo consiste en la eliminación de la humedad presente en él con el objetivo principal reducir su volumen para su posterior manejo y transporte. El proceso tiene lugar en tres centrifugas donde se generan dos corrientes: una de agua que se recircula a la línea de aguas y la corriente de fango deshidratado, un fango seco e inerte que puede destinarse al vertedero, usarse como fertilizante agrícola o someterse a procesos de incineración o co-incineración en cementeras. Los lodos generados en la EDAR de Valladolid se estiman en 30.500 Tm/año. [10]

1.1.4. Línea de gas

La estación depuradora de Valladolid cuenta con un sistema de cogeneración donde se produce y aprovecha simultáneamente electricidad y calor gracias al almacenamiento del biogás producido en la digestión de los fangos, que debido a su gran contenido en gas metano, es utilizado como combustible para producir energía eléctrica. Se logra satisfacer a más del 100% la demanda eléctrica de la planta y exportar a la red eléctrica.

El biogás es almacenado en dos gasómetros de membrana que cuentan con una capacidad de 2150 m³ cada uno, que alimentan a 3 motores que logran producir una energía de unos 33 millones de kWh anuales.

La energía calorífica obtenida de la refrigeración de los motores se utiliza para el calentamiento de los fangos destinados a digestión anaerobia, obteniéndose también energía térmica de los gases de escape de los motores.

Uno de los objetivos para el año 2019 propuesto por Aquavall fue modificación del trazado de la tubería de biogás, incorporando cinco nuevos caudalímetros

para obtener el balance instantáneo entre el biogás producido y consumido por la planta.

[2], [6]

1.2 Tratamiento de los lodos de EDAR

La composición de los lodos de depuración y, por lo tanto, su potencial energético se ve influenciado por las aguas residuales y los procesos de tratamiento de estas. [11]

Generalmente en los fangos se encuentran elementos con valor agrícola como materia orgánica, micronutrientes, fósforo, nitrógeno y potasio, también magnesio y calcio, aunque estos últimos en menor medida. Al ser el medio donde se concentra la carga contaminante eliminada en los diferentes tratamientos que se le realizan al agua residual, encontramos concentraciones de metales pesados como zinc, plomo, cobre, níquel y cadmio, materia orgánica contaminante, y bacterias patógenas. [12]

La gestión y el tratamiento de los lodos de depuradora son costosos y representan casi la mitad del costo total del tratamiento de aguas residuales. [13] Sin embargo, los lodos de depuración son reconocidos como una materia prima prometedora para la generación de energía a través de diferentes métodos de tratamiento aplicados.

La importancia del tratamiento de los lodos de las estaciones depuradoras de aguas residuales sugiere nuevas formas de análisis en las que la relevancia de los criterios económicos, combinada con las cuestiones ambientales asociadas, está aumentando la complejidad de la gestión de los lodos.

1.2.1. Alternativas

En este apartado se estudiarán diferentes alternativas con el objetivo de convertir un residuo imparable de la sociedad, como son los lodos de depuradora, en un recurso para la adaptación a la crisis energética. Apoyando conceptos sumamente importantes: la sostenibilidad y la valorización.

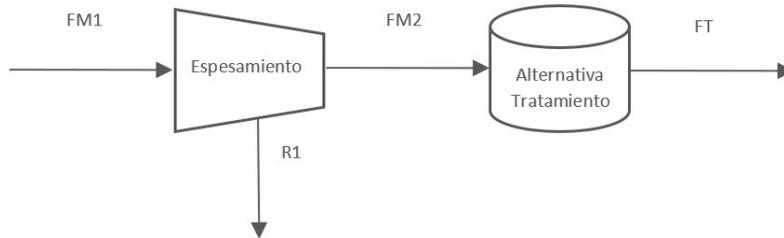


Ilustración 5. Esquema general de tratamiento del lodo mixto

El fango mixto (FM1) es espesado recirculando una corriente compuesta principalmente por agua (R1) a la línea de aguas y se obtiene un fango espesado (FM2) que será sometido a un tratamiento dando lugar a una corriente de fango tratado. Las diferentes alternativas más desarrolladas que pueden utilizarse para el tratamiento de lodos son:

- Digestión aerobia
- Oxidación con agua supercrítica
- Incineración
- Gasificación
- Digestión anaerobia

1.2.1.1. Digestión aerobia de lodos

El proceso de digestión aerobia consiste en la descomposición de la materia orgánica presente en los lodos gracias a la acción de microorganismos, en presencia de oxígeno y a temperatura ambiente.

La mezcla de fango primario y secundario es aireada durante un periodo de tiempo durante el que va disminuyendo la concentración de sólidos suspendidos volátiles (SSV). El resultado de la digestión aerobia depende de la utilización de sistemas de difusores o de un aireador a chorro para alimentar la corriente de aire que producirá la oxidación de los lodos mientras las bacterias digieren rápidamente las sustancias orgánicas de la mezcla, convirtiendo una parte sustancial del lodo en productos volátiles: CO₂, NH₃, H₂. [14] [15]

Dentro de las ventajas de la digestión aerobia de lodos destacan su bajo capital de inversión comparado con el proceso de digestión anaerobia, sus simples requisitos de control, la producción de un fango digerido con una baja DBO₅, con pocos sólidos y bajas concentraciones de fósforo. Este proceso tiene sus desventajas como la necesidad de gran aporte energético que genera grandes costos de operación y la dificultad que presentan los lodos digeridos mediante

este tratamiento para ser separados mediante procesos simples como la centrifugación o la filtración al vacío. [16]

Sin embargo, la digestión aerobia de los lodos es adecuada para plantas de tratamiento residuales de pequeño y mediano tamaño que no necesiten grandes consumos de energía.

Existen nuevas investigaciones en este campo de tratamientos aerobios. A principio de la década de 1970 se introdujo por primera vez el proceso de **digestión aeróbica termofílica autotérmica** y desde entonces ha sido adoptado por un número considerable de pequeñas y medianas plantas de tratamiento de aguas residuales en Europa y América del Norte. Esta tecnología se desarrolla en varias etapas, aunque laboratorios chinos están experimentando con la digestión aeróbica termofílica autotérmica en una sola etapa. Esta tecnología produce lodos con características de deshidratación deficientes, aunque incluye ventajas como una buena degradación de la biomasa, un corto tiempo de retención del lodo y una eficiente inactivación de los patógenos que hace que los lodos digeridos mediante esta técnica sean más valiosos para su aplicación agrícola. [17]

1.2.1.2. *Oxidación con agua supercrítica*

La oxidación en agua supercrítica se considera un proceso innovador y respetuoso con el medio ambiente, eficiente en el tratamiento de los lodos residuales. En el proceso de tratamiento de lodos por oxidación, los residuos orgánicos acuosos se combinan con un oxidante (normalmente, aire u oxígeno puro) en condiciones por encima del punto crítico del agua (373,95°C, 220,64 bar), normalmente 400-600°C y 250 bar. Esta técnica de pretratamiento de los lodos puede lograr una eliminación de materia orgánica superior al 99% operando en tiempos de reacción de menos de un minuto.

Los principales productos de este proceso son agua, CO₂ y sales inorgánicas. Aunque las emisiones de gas generadas en este proceso contienen principal e inherentemente CO₂, además de una posible baja concentración de óxido nitroso (N₂O), no se producen más emisiones nocivas.[18]

1.2.1.3. *Incineración*

Esta alternativa permite recuperar la energía contenida en los lodos residuales mediante su conversión en calor y energía eléctrica. La incineración de lodos de aguas residuales puede ser una solución conveniente en muchas situaciones, ya que se considera rentable en las grandes zonas urbanas donde la distancia a la agricultura o al vertedero hace que el transporte sea caro y cuando se imponen restricciones a los vertederos.

Sin embargo, los costos se convierten en un importante factor de influencia. La incineración funciona a temperaturas extremadamente altas (superiores a 850°C), produciendo dañinas emisiones gaseosas (que contienen, entre otras, dioxinas y furanos), cuyo tratamiento puede ser muy costoso y a veces prohibitivo. [18]

1.2.1.4. Gasificación

Después del tratamiento de incineración, la gasificación es el tratamiento térmico de lodos más común. La gasificación consiste en la oxidación parcial de sustancias orgánicas convirtiéndolas en monóxido de carbono e hidrógeno, mezcla de gases conocida como **gas de síntesis**, en presencia de aire limitado.

El gas de síntesis producido a partir de lodos de depuración tiene un contenido energético comparable al del gas de síntesis de la biomasa, además, las cenizas generadas como subproducto pueden ser reutilizadas de forma beneficiosa (horno de cemento, asfalto, cerámica). [18]

Para valorar todas las alternativas propuestas, a las que se suma la digestión anaerobia de lodos, explicada detalladamente en el siguiente apartado, se siguen tanto criterios económicos como ambientales.

Desde el punto de vista económico, la integración de los costes de inversión y los costes operacionales es decisiva durante el proceso de toma de decisiones para seleccionar la mejor alternativa, que es la que tiene los costes totales equivalentes anuales más bajos (TAEC). El valor de estos costes equivalentes, junto con los ingresos previstos de cada alternativa, es la base para el cálculo del flujo de caja anual (FCA), parámetro que se utilizará para la comparación de las alternativas.

Aunque ninguna de las cinco alternativas es económicamente viable, la evaluación económica permite identificar la mejor alternativa. En los estudios de las diferentes alternativas propuestas [18], la digestión anaeróbica seguida de un proceso de compostaje resultó ser la mejor de las cinco alternativas, ya que su valor de FCA es el más cercano a cero o menos negativo, siendo la peor alternativa la incineración, con un flujo de caja anual 9,5 veces menor que el de la digestión anaerobia.

Desde el punto de vista ambiental, la mejor alternativa es la oxidación supercrítica con el potencial de calentamiento global más bajo. Las tecnologías térmicas como la incineración y la gasificación presentan las mayores emisiones de CO₂, ya que no son alternativas autosuficientes desde el punto de vista energético y por tanto las peores alternativas desde este punto de vista

ambiental. Las técnicas de tratamiento de digestión anaerobia están a medio camino entre las tecnologías térmicas y la oxidación. [18]

1.2.2. Digestión anaerobia

La digestión anaerobia de los lodos es un método prometedor que compensa tanto energética como económicamente una parte del tratamiento de aguas residuales debido a que esta técnica de tratamiento estabiliza los lodos, ayuda a la eliminación de olores y patógenos, y genera gran cantidad de gas metano. El metano puede ser utilizado como biocombustible, que tiene valor comercial como fuente de bioenergía renovable, además el fango digerido puede ser utilizado como fertilizante sustituto de los fertilizantes químicos. [19]

1.2.2.1. GENERALIDADES

El proceso de digestión anaerobia agrupa una serie de procesos naturales en los que, en ausencia de oxígeno, ciertos grupos de microorganismos, generalmente bacterias termófilas o mesófilas, degradan la materia orgánica mediante procesos de reducción y oxidación generando como producto principal biogás y como residuo un fango digerido o digestato rico en nitrógeno gaseoso (N_2). [20]

El proceso de digestión anaerobia comprende un gran número de reacciones bioquímicas en las que participan una gran cantidad de microorganismos. El proceso de transformación de la materia orgánica en metano tiene lugar en 4 etapas:

- Hidrólisis: La primera etapa de la digestión anaerobia comprende la fase de hidrólisis de la materia orgánica compleja mediante la acción de enzimas hidrolíticas extracelulares. Es decir, los carbohidratos de cadena larga, las grasas y las proteínas se rompen gracias a la acción de enzimas hidrolíticas en azúcares de cadena corta, ácidos grasos y aminoácidos, respectivamente. [21]
- Etapa fermentativa o acidogénica: Los monómeros que se han generado en la etapa de hidrólisis son absorbidos por diferentes bacterias acidogénicas y se degradan en la segunda fase a ácidos grasos de cadena corta (ácido butírico, ácido acético, etc.), alcoholes, N_2O , H_2S , H_2 y CO_2 . [22]
- Etapa acetogénica: La acetogénesis es el tercer paso de la digestión anaerobia, donde los ácidos orgánicos y alcoholes son digeridos para

producir ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno. Esta conversión está hasta cierto punto controlada por la presión parcial de hidrógeno en la mezcla ya que las bacterias acetogénicas pueden obtener la energía necesaria para su supervivencia y crecimiento sólo en concentraciones muy bajas de H_2 . Al mismo tiempo, los compuestos orgánicos de nitrógeno y azufre se reducen a sulfuro de hidrógeno y amoníaco.

Las bacterias acetogénicas forman principalmente H_2 , CO_2 y acetato cuando la presión parcial de hidrógeno es baja, y ácidos butírico, butilacético, propanoico y valérico además de etanol cuando la presión parcial de hidrógeno es más alta. De estos productos, los microorganismos metanogénicos, presentes en la siguiente etapa de la digestión, sólo pueden procesar acetato, H_2 y CO_2 .

La fase acetogénica limita la tasa de degradación en la etapa final. La actividad de las bacterias acetogénicas puede evaluarse a través de la cantidad y la composición del biogás. [13] [22]

- Etapa metanogénica: El último paso es la metanogénesis. Cuando la metanogénesis llega a su fase final, el gas metano es producido por dos grupos de bacterias metanogénicas: el primero descompone el acetato en metano y dióxido de carbono; y el segundo utiliza el hidrógeno (donante de electrones) y el dióxido de carbono (aceptante) para producir metano. [13]

1.2.2.2. *BIOGÁS*

El biogás es una mezcla gaseosa compuesta mayoritariamente por metano (CH_4) aproximadamente en un 60-70% y por dióxido de carbono, aunque su composición depende de las características del sustrato digerido. Su alto contenido en este gas combustible hace que el biogás sea un recurso eficiente para la producción de energía ya que es la única energía renovable que puede usarse para cualquiera de las grandes aplicaciones energéticas: eléctrica, térmica o como carburante. Las características del biogás se presentan a continuación:

Composition	55–70% methane (CH₄) 30–45% carbon dioxide (CO₂) Traces of other gases
Energy content	6.0–6.5 kWh m ⁻³
Fuel equivalent	0.60–0.65 l oil m ⁻³ biogas
Explosion limits	6–12% biogas in air
Ignition temperature	650–750 °C (with the above-mentioned methane content)
Critical pressure	75–89 bar
Critical temperature	–82.5 °C
Normal density	1.2 kg m ⁻³
Smell	Bad eggs (the smell of desulfurized biogas is hardly noticeable)
Molar Mass	16.043 kg kmol ⁻¹

Ilustración 6. Características del biogás [22]

COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS

- ✓ Metano: Hidrocarburo inflamable que se presenta en forma gaseosa a temperaturas y presiones ordinarias. Su alta inflamabilidad y su presencia en el biogás en un 60-70% convierten al biogás en un combustible renovable de alto aporte energético. Tiene un potencial de calentamiento global 21 veces superior al CO₂, por lo que el aprovechamiento apropiado del biogás tiene un gran potencial para contribuir a reducir emisiones de gases de efecto invernadero. [23]
- ✓ CO₂: El dióxido de carbono es un gas inodoro, incoloro, ligeramente ácido y no inflamable. Está presente aproximadamente en un 30-40% en el biogás producido en el proceso de digestión anaerobia, por lo que se están investigando métodos de separación y conversión del dióxido de carbono para la obtención de un biometano purificado que pueda emplearse para diferentes aplicaciones. [24]

La composición de metano del biogás depende de diferentes factores: [22]

- **Adición de hidrocarburos de cadena larga**: La adición de grasas, puede ayudar a mejorar la calidad del gas ya que aumenta la producción de metano en la etapa de metanogénesis. Se debe tener cuidado ya que un exceso de grasas puede provocar un aumento de pH.
- **Número de átomos de carbono (C) del sustrato**: Un elevado contenido en carbono favorece la formación de metano.
- **Tiempo de residencia**: Generalmente la descomposición anaerobia de la materia orgánica mejora cuando aumenta el tiempo de digestión. Esto es debido a que durante la etapa metanogénica, hacia el final del

tiempo de residencia, la producción de carbono aumenta, mientras que en la etapa de hidrólisis se ha estado liberando CO₂.

- **La activación, la estructura y el grado de desintegración del sustrato:** La presencia de complejas estructuras de flóculos, paredes celulares duras y grandes cantidades de materia orgánica molecular en el lodo dificultan la etapa de hidrólisis de la digestión anaerobia. Por consiguiente, el pretratamiento de los lodos residuales es un requisito previo para la activación del sustrato acelerando así la hidrólisis y mejorando la eficiencia del proceso de digestión anaerobia [13]. En este trabajo nos centraremos en los pretratamientos térmicos, en concreto en la hidrólisis térmica.
Respecto a la estructura y el grado de desintegración del sustrato ocurre lo mismo, es decir, a mayor área superficial del sustrato, mayor efectividad de las enzimas hidrolíticas, por lo que la materia orgánica sería más fácil de hidrolizar quedando así mejor preparada para la digestión y obteniéndose mayor producción de metano.
- **Contenido de líquido en el biorreactor:** Un mayor contenido de líquido en el reactor significa una mayor concentración de CO₂ disuelto en el agua, reduciendo el nivel de este compuesto en la fase gaseosa.
- **Temperatura del proceso:** Un aumento de temperatura disminuye la solubilidad. El metano es un gas muy poco soluble y no se ve afectado, sin embargo, el aumento de temperatura, sobre el CO₂ al ser moderadamente soluble hace que su solubilidad disminuya y aumente su concentración en la fase gaseosa.
- **Presión:** La presión tiene un efecto inverso a la temperatura. Un aumento de presión se transforma en un aumento en la solubilidad de los gases.
- **Aporte energético:** La fuente de alimentación debe aportar una energía constante para conseguir una hidrólisis adecuada.

El biogás, además de metano y dióxido de carbono acoge otra serie de compuestos a nivel de traza que se comportan como impurezas, por lo que es necesaria la limpieza del combustible dependiendo de sus usos. La proporción de las impurezas varía con el tiempo de operación ya que las características del sustrato también varían a lo largo del tiempo. Las principales impurezas y sus efectos son: agua, sulfuro de hidrógeno, hidrógeno y nitrógeno gaseosos,

monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles como hidrocarburos halogenados, siloxanos, etc.

- ✓ Sulfuro de hidrógeno: El contenido del biogás en H_2S depende del proceso de digestión además de estar sujeto a considerables variaciones inexplicables en el curso del día. La concentración de este elemento debe mantenerse lo más baja posible ya que causa múltiples problemas y reduce la vida útil de las instalaciones. Sin un paso de desulfuración esta concentración puede llegar a alcanzar fácilmente valores por encima de los 1000 mg/m^3 , por lo tanto, el biogás es normalmente desulfurado mientras aún está en el digestor.
- ✓ N_2 y H_2 : La presencia de estos elementos en el biogás es debido a la entrada de pequeñas cantidades de aire al proceso de digestión.
- ✓ Amoniaco: Generalmente se encuentra presente en cantidades bajas, aunque tiene carácter corrosivo y es muy agresivo con algunos materiales como el aluminio y el cobre, lo que reduce la vida útil de los equipos.
- ✓ Vapor de agua: El vapor de agua es especialmente problemático en los puntos donde se produce condensado ya que la presencia de agua promueve la corrosión producida por el H_2S , el CO_2 y el NH_3 .
- ✓ Compuestos orgánicos volátiles: (hidrocarburos halogenados, siloxanos, mercaptanos e hidrocarburos aromáticos) provocan problemas durante la combustión del biogás y se deben eliminar en la mayor medida posible.

APLICACIONES DEL BIOGÁS

Las técnicas de purificación del biogás donde separan eliminan o transforman los compuestos que contaminan el metano obteniendo así metano purificado o biometano, están en vías de investigación para su mejora. Dependiendo de la calidad del biogás existen diferentes aplicaciones en la vida cotidiana:

- **Cogeneración y consumo propio**: La cogeneración es la producción y utilización conjunta, en proceso secuencial, de energía eléctrica y energía térmica. El aprovechamiento del biogás en motores de cogeneración supone unos rendimientos de energía entre el 30% y el 40%. Además, la energía eléctrica puede entregarse a la red eléctrica, recibándose a cambio una remuneración económica. [25] Algunas de las ventajas del uso del biogás dentro de una EDAR para cogeneración y consumo propio de la energía son el ahorro energético, la disminución del impacto ambiental, la garantía de suministro e independencia energética. Como se ha dicho anteriormente, la EDAR de Valladolid

cuenta con un 100% de satisfacción de la energía eléctrica necesitada por la planta además de poder exportar energía a la red. [26]

- **Inyección en la red:** Para inyección de biometano en la red de gas natural se necesita una pureza similar al gas natural, aproximadamente en % mol del 99,7%. [27]
- **Combustible para vehículos:** Al igual que para la inyección en la red de gas natural, la pureza del biometano para su utilización como carburante de vehículos debe ser prácticamente la del gas natural y puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto de gasolina como diésel. [16]

1.3 Optimización del tratamiento de lodos: Pretratamientos.

La digestión anaerobia de los lodos de depuración es una de las tecnologías de tratamiento de residuos más eficientes, efectivas y ambientalmente sostenibles.

Sin embargo, la presencia de complejas estructuras de flóculos (sustancias poliméricas extracelulares, EPS), paredes celulares recalcitrantes y grandes cantidades de materia orgánica molecular en los lodos hace que la digestión anaerobia de lodos tenga limitaciones en cuanto a la eficacia de eliminación de sólidos volátiles (con un porcentaje de eliminación en torno al 40-50%), relacionado directamente con la tasa de producción de biogás, implica mayores tiempos de retención y biorreactores más grandes. [13]

Por este motivo, se encuentran diferentes opciones de pretratamiento del fango previo a la digestión anaerobia que implican medios físicos, químicos y biológicos separados o combinados para alterar la estructura flocular de los lodos e hidrolizar la materia orgánica. Esto proporciona mejoras significativas en términos de eliminación de sólidos, producción de biogás y propiedades del lodo digerido, lo que influye de forma directa sobre el balance económico de la planta.[19]

1.3.1. Alternativas de pretratamiento

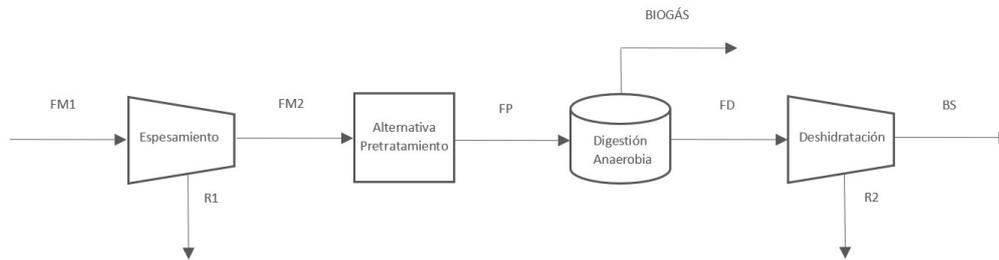


Ilustración 7. esquema general de introducción de pretratamiento a la digestión anaerobia de lodos de EDAR.

El fango mixto de la estación depuradora (FM1) se centrifuga para conseguir un fango espesado (FM2) obteniéndose también una corriente de agua (R1) que es recirculada a la línea de aguas. Antes de someterse al proceso de digestión anaerobia, con el fin de mejorar el rendimiento de esta, el FM2 es sometido a una de las diferentes alternativas de tratamiento que serán estudiadas y comparadas a continuación, obteniéndose un fango pretratado (FP) que ya es conducido hasta los digestores anaerobios donde se produce el proceso de digestión anaerobia. De los digestores anaerobios conseguimos una corriente de biogás (BIOGÁS) y el fango ya digerido (FD). Para obtener el biosólido (BS) o fango seco, se somete el fango digerido (FD) a un proceso de deshidratación del que también se obtiene una corriente de recirculación a la línea de aguas (R2).

Dentro de las tecnologías de pretratamiento utilizadas para mejorar la degradación de la materia y directamente la producción de biogás, encontramos técnicas mecánicas, químicas, térmicas y biológicas.

La eficacia y el valor relativo de cada una de las tecnologías de pretratamiento se comparan en términos de las propiedades del lodo resultante, el rendimiento de los digestores, los beneficios ambientales y el estado actual de la aplicación en el mundo real.

<ul style="list-style-type: none"> • Físicos/mecánicos 1. Ultrasonidos 2. Homogeneización a alta presión 3. Microondas 4. Desintegración electrocinética 5. Molino de bolas 	<ul style="list-style-type: none"> • Químicos 1. Tratamiento álcali 2. Tratamiento ácido 3. Oxidación (ozonación, peroxidación, proceso Fenton)
<ul style="list-style-type: none"> • Térmicos 1. Tratamiento a baja temperatura 2. Tratamientos a alta temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> • Biológicos 1. Tratamiento aerobio 2. Tratamiento anaerobio

3. Congelación/descongelación	3. Tratamiento enzimático
-------------------------------	---------------------------

Ilustración 8. Técnicas de pretratamiento de los lodos de depuradora para mejorar la digestión anaerobia [13]

1.3.1.1. Pretratamientos físicos/mecánicos

Los tratamientos físicos, sin la adición de compuestos adicionales como químicos, enzimas u hongos reducen el tamaño de partícula de los sólidos teniendo como objetivo el aumento de la superficie específica del lodo, lo que mejora el contacto entre el sustrato y los microorganismos. El pequeño tamaño de las partículas de los sustratos causa una disminución de la viscosidad que proporciona una mejor mezcla y la reducción de las capas flotantes en el reactor que impiden que se escape el biogás producido en el reactor. [28]

Estas tecnologías son el grupo más estudiado de pretratamiento de lodos residuales y las técnicas más relevantes incluyen: ultrasonidos, homogeneización a alta presión, microondas y desintegración electrocinética.

- **Ultrasonidos:** Esta técnica es un método de pretratamiento mecánico emergente y muy eficaz para mejorar la biodegradabilidad de los lodos que consiste en una presión sonora cíclica con una frecuencia superior a 20 kHz.[29]

Los ultrasonidos mejoran la digestibilidad de los lodos al alterar las propiedades físicas, químicas y biológicas de los mismos que implica una reducción del tamaño de las partículas, una mayor solubilización de los compuestos orgánicos, la estimulación de la actividad biológica y la liberación de enzimas. Hay que tener en cuenta que el grado de desintegración depende de los parámetros de sonicación y también de las características del lodo que se vaya a tratar.[13]

Cuando perturbaciones como las ondas de ultrasonido se propagan en el lodo, generan zonas de baja presión donde el líquido se vuelve gaseoso formando microburbujas. Las burbujas migran a zonas de alta presión y crecen hasta un tamaño crítico antes de romper violentamente. Este proceso se conoce como cavitación y llega a generar fuertes fuerzas hidromecánicas de ruptura que alteran la estructura del lodo volviéndolo más biodegradable.[19]

La aplicación de este tratamiento antes de la digestión anaerobia de los lodos se traduce en **un aumento de la producción de biogás de entre el 40-58%**. Sin embargo, no todos los estudios pueden confirmar la mejora en la producción de biogás y la eliminación de sólidos volátiles además

de tener necesidad de grandes aportes de energía que implica elevados costes. [13]

- **Homogeneización a alta presión:** El pretratamiento de homogeneización a alta presión somete los lodos a presiones de hasta 900 bares seguido de una abrupta descompresión al pasar por una válvula. El lodo despresurizado impacta en una superficie sólida al salir de la válvula, liberando el contenido de la célula debido a la acción del gradiente de presión, el esfuerzo cortante, la turbulencia y la cavitación, consiguiendo así la hidrólisis de las macromoléculas además de reducir los sólidos volátiles causantes de los malos olores. [19]

Mediante la aplicación de la homogeneización a alta presión se consigue un **aumento de la producción de biogás en un 43-90%**. Sin embargo, esta técnica tiene un menor efecto en la eliminación de patógenos además de consumir una alta cantidad de energía.[13]

- **Microondas:** El pretratamiento del fango de depuradora por microondas se considera como una alternativa popular a la tecnología de calentamiento convencional. [9]

La aplicación de microondas tiene efectos térmicos y no térmicos en las propiedades del lodo. Los efectos térmicos se producen debido a la interacción del campo eléctrico de la radiación con las moléculas dipolares, aumentando la temperatura debido a la rotación y fricción molecular. Los efectos no térmicos se asocian con un rápido cambio en la orientación dipolar de las macromoléculas que componen la membrana celular, rompiendo los enlaces de hidrógeno entre las moléculas y, por lo tanto, destruyendo la membrana. Si bien los efectos térmicos de la irradiación de microondas están bien estudiados, los efectos no térmicos son más difíciles de medir y, por lo tanto, su influencia en el proceso general de pretratamiento no se conoce plenamente. [19]

El principio fundamental de esta tecnología es la radiación electromagnética. Se utilizan longitudes de onda que van desde 1 mm hasta 1 m con las frecuencias de operación correspondientes de 300 MHz hasta 300 GHz. Las estructuras complejas de los sustratos se rompen en componentes pequeños y uniformes que aumentan la degradabilidad del lodo además de conseguir la destrucción de bacterias patógenas. Varias investigaciones sobre este pretratamiento han dado como resultado un **aumento en la producción de biogás en un 20-53 %**. Sin embargo, como desventajas de este pretratamiento

encontramos la alta demanda de energía comparada con el tratamiento térmico convencional, además de que la distribución de la energía de las microondas no es uniforme y puede desarrollar ondas estacionarias y no hay degradación directa de la biomasa [28][13]

- **Desintegración electrocinética o campo eléctrico pulsado:** Este pretratamiento utiliza campos eléctricos pulsados de alto voltaje (20-30 kV). El lodo pasa por una tubería donde se aplica un alto voltaje que crea una fuerza que, cambiando la carga en las moléculas (polar-apolar), induce la repentina la ruptura de los rígidos flóculos del lodo y las membranas celulares liberando materia orgánica intracelular por lo que facilitan el acceso de los nutrientes a las bacterias fermentadoras consiguiendo un **aumento de la producción de biogás del 30%**. Hay que tener en cuenta, como una posible desventaja, que la biomasa no es degradada directamente. [9] [13] [19]
- **Molino de bolas:** La trituración es un proceso mecánico de pretratamiento en el que la mayoría de los sustratos pueden reducirse a partículas finas, lo que lleva a un aumento de la superficie específica del lodo que hace que la solubilización de la materia orgánica aumente en un 45%.

Los procesos de molienda pueden consisten en varios métodos de pretratamiento como la bola, el martillo de dos rodillos y la trituración coloidal para el lodo. La tecnología de trituración en molino de bolas ha surgido como un proceso de pretratamiento beneficioso para reducir el crecimiento microbiano en los procesos de digestión anaerobia del fango de depuradora consiguiendo un **aumento en la producción de biogás en un 20-41%**. Los inconvenientes de este tratamiento físico son los altos requerimientos de energía. [13]

Todas estas técnicas de pretratamiento físico, de una forma u otra, consiguen aumentar la producción de biogás. Sin embargo, el principal inconveniente común de estas técnicas de pretratamiento es su alto consumo de energía. Aunque el pretratamiento físico tiene un efecto positivo en la producción de biogás, el porcentaje de aumento del rendimiento varía según los tipos de sustratos debido a sus estructuras únicas y a los diferentes métodos de pretratamiento físico. [28]

1.3.1.2. Pretratamientos químicos

El pretratamiento químico es un método ampliamente utilizado para no solo aumentar eficazmente la descomposición de las estructuras complejas de la materia orgánica, sino también para reducir el tiempo de retención hidráulico del digestor. Estas tecnologías emplean fuertes reactivos para favorecer la desintegración de la materia orgánica de los lodos. Los principales reactivos empleados incluyen ácidos, álcalis y oxidantes. [28]

El resultado del pretratamiento químico depende principalmente de las características de los compuestos orgánicos, el tipo de método aplicado y la variedad química utilizada. A continuación, se exponen los diferentes tratamientos químicos más utilizados.

- ✓ **Pretratamiento con álcali:** El tratamiento alcalino de los lodos provoca la ruptura de las sustancias poliméricas extracelulares (EPS) que forman flóculos y de las células, liberando la materia orgánica interna sin producir residuos tóxicos para los posteriores procesos. Con esto se consigue acelerar la hidrólisis de los lodos y, en consecuencia, mejorar el rendimiento de la digestión anaerobia con éxito **aumentando la producción de biogás en un 38-80%**. Además, las técnicas de tratamiento de lodos alcalinos también liberan el agua contenida en el interior de los flóculos y la estructura celular, que no puede ser eliminada por los procesos de deshidratación convencionales. Por lo tanto, el tratamiento alcalino puede mejorar la capacidad de deshidratación de los lodos.

La eficacia del pretratamiento álcali de los lodos depende del tipo de reactivo químico utilizado y su concentración, que se enumeran en orden descendente de eficacia: $\text{NaOH} > \text{KOH} > \text{Mg}(\text{OH})_2 > \text{Ca}(\text{OH})_2$.

En comparación con otros métodos, el tratamiento con alcalinos tiene varias ventajas como su fácil manejo y su gran eficacia, además de sus bajos requerimientos de energía ya que se puede operar en condiciones estándar. [13] [30]

La cantidad de productos químicos es uno de los parámetros operativos clave del pretratamiento alcalino. Las altas concentraciones se asocian normalmente a niveles más altos de solubilización, pero si son excesivamente altas pueden reducir la actividad de los organismos anaerobios debido al pH de los lodos pretratados o a la presencia de inhibidores. Además, existen otros inconvenientes como el alto coste del

catalizador álcali o los residuos químicos que pueden alterar la capacidad tampón del sistema. [13] [31] [32]

- ✓ **Pretratamiento con ácidos:** el pretratamiento ácido ha recibido una atención considerablemente menor que el alcalino, y son pocos los estudios que informan de su influencia en las propiedades de los lodos y su consiguiente digestión anaerobia. Sin embargo, los resultados actuales muestran que el pretratamiento alcalino es más eficaz que el ácido en lo que respecta a la hidrólisis y la solubilización de la materia orgánica.

El principio del pretratamiento ácido es similar al alcalino, ya que el ácido descompone los polímeros en monómeros u oligómeros, lo que aumenta la tasa de digestión al realizarse una hidrólisis parcial. **El aumento de la producción de biogás es de un 14-24%.**

Este tratamiento tiene grandes inconvenientes como los altos costes de construcción del reactor, la corrosividad de los ácidos y los altos costes de neutralización del proceso. [13] [19]

- ✓ **Oxidación:** Los pretratamientos basados en reacciones de oxidación acogen la oxidación con ozono (O_3), el proceso Fenton (oxidación con H_2O_2 y Fe^{2+}) y la oxidación con peróxidos.

El pretratamiento con ozono se distingue de otros pretratamientos químicos, ya que no se requieren productos químicos adicionales, aparte del ozono. Las propiedades oxidantes del O_3 pueden utilizarse para pretratar los lodos, hidrolizando parcialmente la materia orgánica y aumentando la biodegradabilidad de los lodos activados por los desechos. Además, los compuestos recalcitrantes y tóxicos pueden ser eliminados por la acción del ozono. El mecanismo de acción del ozono implica una rápida descomposición en radicales que oxidan tanto las partículas como la materia orgánica soluble mediante reacciones directas e indirectas. Las reacciones indirectas se basan en la alta reactividad de los radicales hidroxilos, mientras que la velocidad de reacción directa depende más de la estructura del sustrato.

Entre los efectos positivos del pretratamiento del ozono figuran la reducción significativa del volumen de lodo, la eliminación de los residuos químicos y una mejor estabilización del lodo ya que elimina los microorganismos patógenos de los lodos, además del **aumento de la producción de biogás en un 20-200%**. [13][19]

Sin embargo, al igual que con los pretratamientos alcalinos y ácidos, la cantidad de reactivo utilizada es un importante parámetro del proceso ya que el objetivo del pretratamiento es la oxidación parcial y la hidrólisis de los lodos, por lo que debe evitarse la oxidación completa. Un exceso de ozono puede provocar la formación de compuestos recalcitrantes y el consumo de materia orgánica. La dosis óptima para aumentar la eficiencia de la digestión anaerobia es alrededor de 0,05-0,5g O₃/g ST. Además, la inestabilidad del ozono y los elevados requisitos energéticos para la generación de este son los principales inconvenientes de la ozonización. [13] [19]

El proceso Fenton o la oxidación con H₂O₂ y Fe²⁺ se ha aplicado frecuentemente para mejorar la deshidratación de los lodos de depuradora y su biodegradabilidad. El ion ferroso reacciona con el H₂O₂ en un valor de pH ácido entre 2 y 3 y crea radicales hidroxilos altamente reactivos. Los radicales hidroxilos tienen un potencial de oxidación más alto en condiciones ácidas (+2,80 V) que el peróxido de hidrógeno (+1,36 V) y el ozono (+2,07 V). Durante las reacciones, los radicales hidroxilos atacan y destruyen varios materiales orgánicos sin ningún subproducto tóxico o inhibidor. Las concentraciones de H₂O₂, el tiempo de contacto, el pH inicial y la temperatura tienen impactos en este pretratamiento. [9] [13] [28]

Uno de los mayores inconvenientes de este método es el efecto corrosivo debido a las condiciones operacionales de pH. [33] Por tanto, existen otras alternativas innovadoras como el uso de peroxidantes como el peroximonosulfato (POMS) y el dimetildioxirano (DMDO) que no requieren condiciones de reacción estrictas. [19]

Otro agente oxidante, el ácido peracético, forma un radical hidroxilo que reacciona con los compuestos orgánicos. La oxidación con APA podría ser un excelente método de pretratamiento porque no produce ningún subproducto. [13]

En resumen, todos los estudios de investigación señalados en esta sección indicaron que el pretratamiento por oxidación (ozonización, peroxidación, APA y el proceso Fenton) da lugar a un mayor efecto de solubilización de los lodos y una mayor producción de biogás; sin embargo, la corrosividad de la peroxidación puede limitar estos procesos de pretratamiento. [13]

1.3.1.3. *Pretratamientos biológicos*

Los pretratamientos biológicos son técnicas ecológicas que utilizan métodos aeróbicos, anaeróbicos y enzimáticos para predigerir y mejorar las etapas de hidrólisis de la digestión anaerobia de los lodos. Esto se consigue mediante la aplicación de una compleja matriz de microorganismos que desempeñan un papel fundamental durante la desintegración de la estructura del floculo de los lodos y otros compuestos orgánicos.

Esta técnica de pretratamiento, aunque es ecológica y eficaz en función de los costos, lleva mucho tiempo y requiere parámetros óptimos para la proliferación microbiana.[13]

- ✓ **Pretratamientos aerobios:** Los pretratamientos aeróbicos pueden realizarse tratando los lodos con aire y microorganismos aerobios o anaerobios facultativos antes de la digestión anaerobia. La técnica de microaireación consiste en la inyección de oxígeno en el sistema de tratamiento que mejora las actividades hidrolíticas de las bacterias.

El pretratamiento por microaireación estimula la secreción de exoenzimas que biodegradan lentamente sustratos que de otra manera permanecen recalcitrantes en ambientes anaerobios.

Las altas temperaturas termófilas en combinación con el oxígeno estimulan la población microbiana para producir enzimas hidrolíticas que mejoran la solubilización de los lodos y potencian la degradación de los compuestos orgánicos durante la digestión anaerobia **aumentando la producción de biogás en un 20-50%**; por lo tanto, este pretratamiento se denomina también proceso autohidrolítico.

Esta tecnología tiene inconvenientes como la instrumentación necesaria para el proceso de aireación que incrementa los costes, los requerimientos de condiciones óptimas para la actividad microbiana además de la lentitud del proceso. [13]

- ✓ **Pretratamientos anaerobios:** Los pretratamientos anaerobios pueden realizarse mediante la predigestión de los sustratos en ambientes mesófilos o termófilos. El método comúnmente utilizado es la digestión anaeróbica en fase de temperatura (TPAD), una opción eficaz para el pretratamiento de los lodos que utiliza un digestor primario hipertermófilo seguido de un digestor mesofílico secundario. Esta técnica también se conoce como digestión anaerobia de dos etapas y tiene varias ventajas que incluyen un **aumento de la producción de**

biogás del 20-50%, una mejor desintegración de los floculos y la estructura sólida, requisitos de energía térmica bajos y la eliminación de patógenos durante la digestión termofílica.

Sin embargo, al igual que los pretratamientos anaerobios esta tecnología incrementa los costes ya que la instalación de un equipo adicional para el balance energético es necesaria, además de los requerimientos de condiciones óptimas para la actividad microbiana. [13]

- ✓ **Pretratamientos enzimáticos:** La adición de enzimas hidrolíticas (hidrolasas, proteasas y lipasas) en un sistema de pretratamiento mejora la solubilización de los lodos, degrada los EPS y **incrementa la producción de biogás en un 12-40%**. Para que el pretratamiento enzimático tenga éxito, varios parámetros como la actividad, la especificidad, la cantidad, la estabilidad de las enzimas, la temperatura y el pH deben ser evaluados y optimizados. [13]

1.3.1.4. *Pretratamientos térmicos*

El pretratamiento térmico es una técnica bien conocida y comercialmente establecida que se utiliza para mejorar la etapa de hidrólisis de la digestión anaerobia.

En el tratamiento térmico, los lodos de depuradora se someten a altas temperaturas que inducen a la hidrólisis y aumentan la digestibilidad del fango debido a que se desintegran las membranas celulares dando lugar a sustratos orgánicos solubles que se hidrolizan fácilmente durante la digestión. Este pretratamiento mejora la liberación de agua debido a la ruptura de la matriz del lodo mejorándose así la deshidratación de los lodos. Además, el calor hace que los residuos se esterilicen y reduce los agentes patógenos en ellos.

Se han aplicado varias temperaturas (50-250 °C) para el pretratamiento térmico de los lodos de depuradora. El tratamiento térmico puede clasificarse como de baja temperatura (< 100 °C), de alta temperatura (más de 100 °C) y pretratamiento de congelación/descongelación. [11] [24]

- ✓ **Hidrólisis térmica de alta temperatura** (más de 100°C): La temperatura utilizada en el proceso está relacionada directamente con la solubilización de la materia orgánica, sin embargo, el tiempo de pretratamiento no implica grandes cambios en la mejora de la hidrólisis. Varias investigaciones han demostrado que elevadas temperaturas (superiores a 170-190°C) pueden dar lugar a la formación de

compuestos recalcitrantes, además de que puede esperarse una mayor liberación de compuestos inhibidores como el amoníaco y los metales, lo que tiene efectos perjudiciales en la digestión.

La utilización de este pretratamiento **incrementa la producción de metano en un 10-150%** y **reduce la concentración de sólidos volátiles en un 10-160%** además de aumentar la solubilización de las proteínas.

- ✓ **Hidrólisis térmica de baja temperatura (<100°C):** Si bien el principal mecanismo de la hidrólisis a alta temperatura es la alteración física y la solubilización de la materia orgánica, la hidrólisis a baja temperatura puede incluir la solubilización térmica, la estimulación de las bacterias termófilas y la solubilización mediante enzimas hidrolíticas liberadas del lodo. A diferencia de la hidrólisis a alta temperatura, tanto la temperatura como el tiempo de pretratamiento son variables importantes para los procesos a baja temperatura.

La aplicación del pretratamiento a baja temperatura influye en la solubilización de las macromoléculas y también puede dar lugar a la amonificación, la producción de AGV y la liberación de metales pesados a la fase soluble. Además, algunos inconvenientes de esta técnica son la posibilidad de reactivación de los patógenos y ocasionalmente la baja degradación de las macromoléculas.

La utilización de este pretratamiento **incrementa la producción de metano en un 10-100%** y **reduce la concentración de sólidos volátiles en un 20-150%**.

- ✓ **Congelación/descongelación:** El último grupo de pretratamientos térmicos es congelar/descongelar. Es un método que requiere grandes cantidades de energía, pero en zonas donde la congelación se produce de forma natural podría ser una alternativa sostenible a otras tecnologías.

La congelación/descongelación se ha estudiado principalmente como método para mejorar la deshidratación de los lodos. La congelación permite la separación de las fracciones sólidas y líquidas durante la formación de los cristales de hielo y el proceso compacta la estructura del flóculo reduciendo el contenido en agua del lodo y mejorando así la deshidratación de los fangos.

Este pretratamiento puede solubilizar la materia orgánica pero no incrementa la producción de biogás, aunque **reduce la concentración de sólidos volátiles en un 16,9%**. [13]

El examen de estudios anteriores en los que diferentes pretratamientos han sido aplicados varias veces en los lodos de depuración para investigar sus efectos en el crecimiento de la tasa de biogás ha demostrado que la opción biológica es prometedora pero aún solo está probada a pequeña escala en laboratorio y la opción química presenta varios inconvenientes en cuanto a la corrosividad de los procesos. Además, la hidrólisis térmica como pretratamiento ha dado, por lo tanto, muy buenos resultados en el rendimiento del digestor ya que la homogeneización del material va más allá que en un proceso mecánico y la superficie total de las partículas aumenta considerablemente, lo que mejora la degradabilidad biológica. Por tanto, entre pretratamientos térmicos y mecánicos, los tratamientos térmicos son más eficientes y no necesitan pretratar el fango por más de media hora. [34][35]

1.3.2. Pretratamiento térmico seleccionado para el estudio: Hidrólisis térmica

Este Trabajo Fin de Grado se centrará en las tecnologías térmicas de pretratamiento y en especial en la hidrólisis térmica.

La hidrólisis térmica consiste en la alteración de las moléculas orgánicas complejas que reducen el rendimiento de la digestión anaerobia de los lodos en sustancias orgánicas más sencillas e hidrolizables mediante la acción del agua, la presión y elevadas temperaturas. La función de la molécula de agua es romper el enlace intramolecular de la materia orgánica compleja incorporando sus iones (H^+ y OH^-).

Una gran ventaja de la hidrólisis térmica de los lodos es que la necesidad de energía eléctrica es muy baja y el consumo de energía térmica puede ser optimizado para que el balance energético total sea positivo en comparación con el tratamiento de lodos convencional. [36]

El rango de temperaturas de estudio de la hidrólisis térmica como pretratamiento es entre los $130^{\circ}C$ y los $210^{\circ}C$. El lodo se calienta durante un tiempo comprendido entre 5 y 30 minutos a la presión de vapor correspondiente. La presión es una variable que indirectamente nos viene dada con la temperatura y aunque no interesa su valor está entre los 2 bares y los 9 bares.

Si el contenido de agua del sustrato es bajo, se necesita agua adicional para este proceso. El sustrato se hincha por los efectos de la temperatura, la presión y el agua durante el proceso. Por lo tanto, los enlaces que mantienen unidas las estructuras complejas se rompen obteniendo un lodo con materia orgánica más hidrolizada y mucho más degradable en el posterior proceso de digestión. [28] [36]

En la bibliografía, la mayoría de los informes de la aplicación del pretratamiento para diferentes lodos muestras, aceptaron como condiciones óptimas, las temperaturas de 120-180°C y un tiempo de aplicación de 30 a 60 minutos, dependiendo de los componentes del sustrato. Las investigaciones demuestran que el pretratamiento térmico fue efectivo en cuanto a la solubilización del lodo y el aumento de la producción de biogás hasta los 190°C, ya que a más temperatura se producía la formación de compuestos recalcitrantes que suponían un impedimento para la posterior digestión anaerobia. [28]

Estudios demuestran que el mayor efecto sobre la digestibilidad se da a una temperatura de 175°C. A esa temperatura, la digestión de los lodos pretratados térmicamente dio lugar a un aumento del 60 al 70% en la producción de metano con respecto a los lodos no pretratados, ya que se comprobó que a temperaturas más elevadas la producción de biogás disminuía. [35]

Por último, se han evaluado los balances energéticos de los sistemas de hidrólisis térmica/digestión anaerobia con resultados positivos cuando se logran altas concentraciones de lodo y la integración energética adecuada han demostrado que es posible establecer un proceso autosuficiente con un aumento de la generación de electricidad de alrededor del 40% debido a la introducción del pretratamiento térmico. [19]

1.3.3. Hidrólisis térmica intermedia

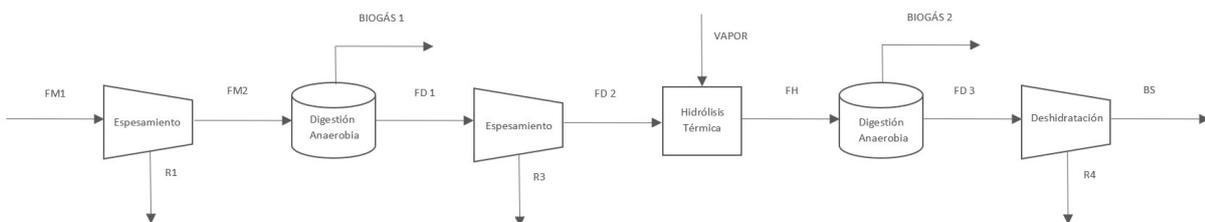


Ilustración 9. Proceso de tratamiento de lodos de EDAR con una etapa de hidrólisis térmica intermedia.

Además de utilizarse como pretratamiento para tratar el lodo de depuradora antes de la digestión anaerobia, es posible aplicar la hidrólisis térmica como un paso intermedio entre dos etapas de digestión anaerobia.

El fango digerido mediante el proceso convencional de digestión (FD1) se somete a un segundo espesamiento con el fin de conseguir una corriente de fango con mayor concentración de sólidos (FD2) y así evitar un desperdicio de energía durante el proceso de hidrólisis térmica. Los sustratos hidrolizados térmicamente (FH) se someten a una segunda digestión de la que se obtiene una segunda corriente de biogás (BIOGÁS2). El digestato (FD3) es deshidratado obteniéndose el biosólido final (BS).

El propósito de tal configuración del proceso es utilizar aún más la energía inherente del digestato recalcitrante (FD1). El contenido de sólidos volátiles restantes en el lodo después de la digestión anaerobia es aproximadamente el 60-70%, lo que muestra un gran potencial para explotarlo y conseguir una mayor recuperación de energía consiguiendo así un proceso en el que priman los conceptos de valorización de residuos y sostenibilidad,

La ventaja de la hidrólisis térmica intermedia sobre la hidrólisis térmica convencional es que los componentes fácilmente degradables del sustrato se convierten biológicamente en biogás durante la primera digestión anaerobia, dejando sólo las fracciones más recalcitrantes para la hidrólisis térmica intermedia. Gracias a esto se consigue una mejora en la producción de biogás después de la segunda digestión, un aumento de la eliminación de los sólidos volátiles, un mayor porcentaje de DQO soluble y la menor cantidad de material a tratar. Además, se aumenta la deshidratabilidad del fango lo que implica un menor consumo de energía al tenerlo más concentrado.

De acuerdo con un estudio comparativo entre los sistemas que incorporan el tratamiento de hidrólisis térmica y la digestión anaerobia convencional realizados en el laboratorio por Díaz et al., (2020) [37] la aplicación de una hidrólisis térmica, en las condiciones de 170°C y 20 minutos, previa a la digestión anaerobia aumentó la eliminación de sólidos volátiles del 35% (en la digestión anaerobia convencional) al 40%, junto con una mejora en la productividad de metano de 281 ± 17 mL CH₄/gSV para lodos mixtos frescos, a 402 ± 12 mL CH₄/gSV para lodos mixtos hidrolizados.

En el caso de la hidrólisis intermedia se obtuvo una eliminación adicional del 26% de sólidos volátiles al realizar el tratamiento térmico y la digestión anaerobia al lodo digerido, junto con una productividad adicional de metano de 281 ± 7 mL CH₄/gSV para el lodo digerido hidrolizado.

Por tanto, se concluyó que el tratamiento de hidrólisis térmica intermedia tenía la mayor eficiencia en la eliminación de sólidos, materia orgánica y nitrógeno. [37]

La bibliografía disponible sobre los tratamientos de hidrólisis térmica intermedia es limitada y se ha centrado principalmente en la cinética de la degradación específica del sustrato y la deshidratación, más que en los potenciales de producción de biogás. [38]

En este Trabajo de Fin de grado se desarrollará una investigación de la aplicación de este tratamiento intermedio a los lodos de depuradora de la EDAR de Valladolid centrada en el potencial de producción de biogás y la eliminación de sólidos volátiles como consecuencia de las diferentes configuraciones de hidrólisis térmica intermedia utilizadas (temperatura, tiempo, concentración) buscándose las condiciones óptimas.

2. Objetivos

Este Trabajo Fin de Grado tiene como **objetivo principal** la optimización de la productividad de biogás y su aprovechamiento mediante el estudio la incorporación de un proceso de hidrólisis térmica entre dos etapas de digestión anaerobia a la línea de lodos de la EDAR de Valladolid con el fin de convertir un residuo imparable de la sociedad, como son los lodos de depuradora, en un recurso para la adaptación a la crisis energética.

Para alcanzar este objetivo global, el TFG plantea los siguientes **objetivos específicos**:

1. Evaluación en laboratorio de las condiciones óptimas de la hidrólisis térmica intermedia obtenidas a partir del asistente de diseño de experimentos del software Statgraphics.
2. Estudio de balances de materia y energía del proceso desarrollados a partir de los resultados obtenidos en el laboratorio.
3. Determinación de las condiciones de operación más favorables desde el punto de vista energético.
4. Comparación de resultados y estudio de la viabilidad técnica del proceso de hidrólisis térmica intermedia.

3. Metodología

3.1 Lodos y caracterización

3.1.1. Muestreo de lodos

El laboratorio de investigación de la Universidad de Valladolid recoge el fango digerido anaeróbicamente de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Valladolid para proceder a los experimentos a estudio en este Trabajo de Fin de Grado. El fango procedente de la EDAR tiene una concentración del 2,365% en sólidos totales (1,292% en sólidos volátiles).

El inóculo anaerobio para los ensayos de potencial bioquímico de metano (BMP) obtenido del digester anaeróbico de la misma planta de tratamiento de aguas residuales se preincubó a 35 °C durante 2 días en una cámara termostática antes de su uso experimental para activar los microorganismos y agotar la mayor parte de la materia orgánica residual.

El inóculo anaerobio procedente del digester de la planta depuradora fue sometido a procesos de centrifugación y espesado hasta concentraciones de 13,246% en sólidos totales (7,299% en sólidos volátiles) para realizar el pretratamiento térmico con lodo concentrado. La utilización del lodo concentrado permite ahorrar energía durante el proceso térmico.

El inóculo concentrado se sometió al proceso de hidrólisis a diferentes condiciones de temperatura y tiempo, dando lugar a la obtención de las muestras de sustrato que posteriormente se someterán a los ensayos de potencial metanogenico. Las muestras fueron almacenadas en botellas de plástico a 4°C, seguido de un cuidadoso aumento de la temperatura de la muestra a las condiciones ambientales antes de utilizarla en las pruebas de BMP.

Para el estudio de la hidrólisis térmica como pretratamiento intermedio se realizaron 5 experimentos por triplicado para luego poder ser comparados entre ellos. Las muestras de cada uno de esos experimentos fueron:

- ✓ **Inóculo anaerobio EDAR Valladolid:** El inóculo es el fango digerido anaeróbicamente y deshidratado que procede de la estación depuradora de Valladolid al que el único tratamiento que se le realiza en el laboratorio es su conservación a 35°C para el agotamiento de toda la materia orgánica posible.

- ✓ **E4:** La muestra E4 es el inóculo anaerobio concentrado mediante procesos de centrifugación desde el 1,292 % de sólidos volátiles al 7,299 %, con su correspondiente 2,3 % y 13,246 % de sólidos totales.

Tabla 1. Caracterización de muestras (inóculo, E4)

	concentración sólidos			
	sólidos volátiles (SV)		sólidos totales (ST)	
	g SV / kg lodo	%	g ST / kg lodo	%
Inóculo anaerobio EDAR	12,92	1,292	23,65	2,365
E4	72,99	7,299	132,46	13,246

- ✓ **E1, E2, E3:** Estas muestras son las obtenidas al someter el inóculo anaeróbico al tratamiento de hidrólisis térmica bajo las diferentes condiciones de operación seleccionadas:
 - E1: 170°C durante 25 minutos son las condiciones óptimas de la hidrólisis térmica convencional
 - E2: 210°C durante 5 minutos fue una de las condiciones seleccionadas arbitrariamente del diseño de experimentos realizado con Statgraphics
 - E3: 210°C durante 45 minutos fue el óptimo dado por Statgraphics para el proceso de hidrólisis térmica intermedia sobre el que se realizó el diseño de experimentos. Durante el tratamiento del inóculo en la planta de hidrólisis se produjo un problema y el fango solo pudo ser hidrolizado durante 8 minutos, por lo que las condiciones reales de la muestra fueron 210°C durante 8 minutos.

Tabla 2. Caracterización de las muestras (E1, E2, E3)

	Temperatura	Tiempo	concentración sólidos			
			sólidos volátiles (SV)		sólidos totales (ST)	
			°C	min	g SV / kg lodo	%
E1	170	25	18,2	1,82	32,77	3,277
E2	210	5	24,68	2,468	44,94	4,494
E3	210	45	20,49	2,049	37,44	3,744

3.1.2. Métodos analíticos

Las concentraciones de sólidos totales, sólidos volátiles, demanda química de oxígeno (DQO) y DQO soluble se determinaron según métodos estándar (APHA, 2012) [39].

La fase soluble para la DQO se obtuvo mediante la centrifugación de las muestras (10.000 rpm y 10 min) en una centrífuga de mesa refrigerada Thermo Sorvall Legend RT+ (Madrid, España) y la filtración del líquido que flota en la superficie mediante un filtro de fibra de vidrio (0,7 μm tamaño de los poros).

Periódicamente, con una jeringa de vidrio de 100 ml para extraer el biogás de la cabeza de las botellas de BMP, se midió la composición de éste utilizando un cromatógrafo de gases acoplado a un detector de conductividad térmica (Varian CP-3800, EE.UU.).

La presión en el espacio de cabeza de las botellas de BMP se midió con un sensor de presión PN 5007 (IFM, Alemania) y posteriormente se procedió a desgasificar dejando las botellas con una presión aproximadamente de 15 mbar para que se pudiera seguir produciendo biogás.

La composición del biogás se analizó utilizando un cromatógrafo de gases acoplado a un detector de conductividad térmica (Varian CP-3800, EE.UU.). El gas producido se ajustó a la temperatura y presión estándar (STP: 0 °C, 1 bar), volumen (V) utilizando la ley del gas ideal y la presión de vapor saturado a 35 °C de 42,2 mmHg.

Al inicio del experimento fue necesario medir la presión, desgasificar y medir la composición del biogás diariamente, ya que la velocidad de producción de biogás aumenta exponencialmente, pero una vez pasado el periodo de referencia las medidas se van alargando en el tiempo ya que la producción va siendo aproximadamente constante.

3.2 Plantas piloto

3.2.1. Descripción del proceso

En el laboratorio, el lodo concentrado al máximo para conseguir el mayor ahorro de energía posible fue pretratado térmicamente en una planta a escala de laboratorio del proceso de hidrólisis térmica (HT).

Para realizar los experimentos es necesario que el tanque de hidrólisis trabaje a las temperaturas de las condiciones elegidas en el diseño de experimentos.

Por tanto, una vez encendida la planta se realizan unas primeras pruebas con agua hasta alcanzar la temperatura adecuada.

El lodo se alimenta manualmente al reactor y luego se suministra vapor saturado desde la caldera que se regula mediante una válvula de control hasta alcanzar la temperatura elegida en el reactor. La conservación del calor comienza cuando la temperatura sube al valor preestablecido con una incertidumbre de $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

El proceso de hidrólisis se realizó a una temperatura de $170\text{-}210^{\circ}\text{C}$ y un tiempo de reacción de 5-45 min con un volumen de muestra de lodo constante de 500 mL para cada experimento. La secuencia y las condiciones de funcionamiento de los ensayos realizados han sido resumidas en el apartado 3.1.1 Muestreo de lodos.

El tanque de hidrólisis está conectado por una válvula de descompresión a un tanque flash con tuberías de salida para el vapor y los lodos hidrolizados. Una vez alcanzado el tiempo establecido de residencia en el reactor de hidrólisis, se produce una rápida descompresión (efecto de explosión de vapor) recogiendo finalmente el lodo hidrolizado en un recipiente a presión atmosférica.

Se utiliza un sistema de adquisición y control de datos para medir la presión y la temperatura y controlar automáticamente la entrada de vapor y la salida de lodos hidrolizados hasta el flash.[40][41]

3.2.2. Descripción de la planta de hidrólisis para evaluación experimental

- ✓ La planta consiste en un reactor discontinuo cilíndrico de acero inoxidable (PN25 DN100) con un volumen de trabajo de 1 L (2 L de volumen total) acoplado a una caldera de vapor (ETE H-20, España). El vapor suministrado desde la caldera se regula mediante una válvula de control (RTK MV 5211, Alemania). El tanque de hidrólisis está conectado por una válvula de descompresión a un tanque flash de acero inoxidable de 35 L.



Ilustración 10. Planta de tratamiento de hidrólisis térmica



Ilustración 11. Reactor de hidrólisis y tanque flash



Ilustración 12. caldera de vapor (ETE H-20, España)



Ilustración 13. Válvulas de control

3.2.3. Ensayos BMP

Las pruebas de potencial de biometano (BMP), aunque se aplican rutinariamente para medir la producción final de metano a partir de diferentes materiales orgánicos, tanto líquidos como sólidos, están lejos de ser triviales. Existen desde hace muchos años varias normas destinadas a la normalización de los ensayos de BMP, como la DIN 38414 TL8 (1985), la ASTM D 5210 (1992), la ASTM D 5511 (1994), la ISO 11734 (1995), la ISO 14853 (1998) y la ISO 15985 (2004), pero su formulación de parámetros importantes suele ser poco clara. Esto deja demasiada libertad de interpretación y, en última instancia, conduce a la utilización de protocolos de ensayo bastante diferentes en distintos laboratorios. [42]

Por tanto, a fin de evaluar las mejoras en la biodegradabilidad del sustrato y el rendimiento final del biogás debido al tratamiento intermedio con hidrólisis térmica, para este experimento se realizaron ensayos de potencial metanogénico (BMP) basados en la metodología sugerida por Angelidaki et al (2009). [43]

Los ensayos se realizaron por triplicado para permitir el análisis estadístico de los datos recopilados y garantizar la reproducibilidad de los ensayos, utilizando botellas de 160 mL con un volumen de líquido de 100 mL llenas de una mezcla correspondiente a la relación sustrato/inóculo de 0,5 g SV sustrato/g SV inóculo. Esta relación es importante debido a que la concentración de inóculo debe ser siempre adecuada para asegurar la correcta degradación del sustrato, es decir, suficiente para evitar la acumulación de ácidos grasos volátiles y evitar sobrecargas por un exceso de sustrato, pero no puede ser demasiado alta para asegurar la actividad correcta del sistema biológico. Los volúmenes de sustrato, inóculo y agua que componen cada experimento por triplicado, se resumen en la *Tabla 3. Parámetros de preparación de BMPs*.

Los nutrientes, micronutrientes y vitaminas son necesarios para asegurar las condiciones adecuadas de los microorganismos anaerobios. En esta prueba, el inóculo se prepara añadiendo en agitación 1 mL/L de micronutrientes y 1 mL/L de macronutrientes, además de 5 g/L de NaHCO_3 para proporcionar capacidad de amortiguación y así evitar una disminución repentina del pH causada por la fermentación ácida durante las primeras etapas de la digestión anaerobia. Para evitar condiciones aeróbicas se añadió una pequeña piedra de $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$.

La producción de metano en los ensayos lleva implícita la producción de metano endógeno en el inóculo, por lo que es necesario añadir, a mayores de los BMP de los experimentos a las condiciones óptimas, un ensayo de inóculo

sin sustrato para restar ese metano endógeno de la producción total y para obtener la producción final neta de CH₄.

Las botellas de ensayos BMP, una vez cerradas y selladas se purgaron con He, el mismo gas que arrastrara las muestras gaseosas en el posterior análisis cromatográfico. Por último, las botellas se incubaron en un agitador rotatorio, en condiciones mesófilas (aproximadamente 35°C) donde la mezcla facilita el contacto entre bacterias y sustratos evitando la acumulación de productos intermedios (como por ejemplo ácidos grasos).

La parada del experimento se produce cuando la producción diaria de metano durante tres días consecutivos sea menor del 1% del volumen acumulado total de metano.

3.3 Diseño de experimentos

La selección de las diferentes condiciones de operación del tratamiento de hidrólisis térmica intermedia es uno de los aspectos más importantes para el estudio de optimización de las condiciones del proceso de hidrólisis intermedia.

Para el diseño de experimentos en este trabajo se ha utilizado el software Statgraphics 18 haciendo uso del Asistente de Diseño de Experimentos.

3.3.1. Descripción de los parámetros a evaluar

En el estudio evaluado se han seleccionado tres parámetros basados en experimentos anteriores sobre la hidrólisis térmica en los que se recogieron los datos de las variables respuesta (la productividad de biogás y la eliminación de sólidos volátiles) al realizar el tratamiento térmico a temperaturas desde los 130°C hasta los 210°C y tiempos de retención desde los 5 minutos hasta 45 minutos, con muestras de fango digerido de concentraciones entre 5,4% y 10,8% de sólidos volátiles. Los datos de los experimentos se encuentran en el ANEXO IV: Experimentos Taguchi.

Los parámetros evaluados en el diseño de experimentos fueron dos factores controlables, entre los que se encuentran la temperatura (T) y el tiempo (time), y un factor no controlable o ruido que será la concentración de sólidos volátiles (cVS).

- ✓ Variables respuesta: Productividad de biogás (BMP, ml CH₄/gSV) y eliminación de sólidos volátiles (VSremoval, %)
- ✓ Factores (controlables y ruido): Temperatura (T, °C), tiempo (time, min) y concentración de sólidos volátiles (cVS, %)
- ✓ Niveles: T (130 - 210 °C), time (5 - 45 min), cVS (5,4 - 10,8%)

3.3.2. Selección del diseño

El objetivo del diseño de los experimentos es la elección de los niveles de los parámetros que optimizan la media de las variables respuesta asegurando que la varianza sea mínima ($\sigma^2 = 0$). La varianza es un parámetro estadístico que mide la dispersión de los datos y representa la variabilidad de éstos con respecto a su media, permitiendo contabilizar y prevenir posibles errores.

Genichi Taguchi, propuso un método para resolver este problema de diseño robusto basado en experimentos diseñados y algunos métodos novedosos para el análisis de los datos resultantes que no resultaron eficaces. En consecuencia, después de un largo periodo de investigación y desarrollo de nuevos métodos para la resolución del problema surgió la metodología de superficie de respuesta como una aproximación al problema de diseño robusto, que no solo permite emplear el concepto de diseño robusto de Taguchi, sino que también proporciona un planteamiento más sólido y eficiente para el diseño y el análisis de los datos.

El diseño robusto de parámetros es un método para las actividades de realización de productos que se centra en la elección de los niveles de factores controlables en un proceso o un producto para lograr determinados objetivos. Un problema de diseño de parámetros robusto puede centrarse en uno o más de los siguientes objetivos:

- ✓ Diseño de sistemas insensibles a los factores ambientales que pueden afectar al funcionamiento o rendimiento una vez que el sistema se instala en el exterior.
- ✓ Diseño de productos para que sean insensibles a la variabilidad transmitida por los componentes del sistema
- ✓ Diseño de procesos para que el producto manufacturado sea lo más cercano a las especificaciones de producto deseado a pesar de que algunas variables del proceso o propiedades de las materias primas sean imposibles de controlar con precisión.
- ✓ Determinación de las condiciones de funcionamiento de un proceso de tal manera que las características críticas del proceso estén cerca de los valores objetivo y la variabilidad alrededor de este objetivo sea mínima.

Por tanto, se tiene un diseño de parámetros robusto en el que la clave es la interacción entre los factores controlables y de ruido para cumplir expectativas independientemente de la variabilidad transmitida por el ruido.

Los factores ruido son un aspecto importante en el diseño de experimentos ya que pueden provocar variabilidad en la respuesta del sistema, pueden ser

variables del proceso que son difíciles de controlar o que provocan dificultad en mantener los objetivos fijados (como es el caso de la concentración de sólidos totales). Además, las variables ruido pueden ser controladas a nivel de investigación y desarrollo, pero no a nivel de la producción o uso del producto.[44]

Los diseños de Taguchi que permiten estudiar las combinaciones de los factores controlables y de ruido son los diseños de vector ortogonal donde las variables son linealmente independientes. El tipo de vector ortogonal utilizado es un vector L9 (3^4), aplicable hasta a 4 variables en 3 niveles distintos

Siguiendo con la selección de diseño de parámetros robusto, es posible seleccionar un vector combinado o un vector cruzado. Se elegirá un vector combinado ya que, para diseños pequeños, con pocos parámetros, es más eficaz que el vector cruzado. Este diseño de vector combinado permite incorporar directamente las interacciones factores controlable-factor ruido.

A continuación, es necesario elegir el tipo de modelo de respuesta. Entre un modelo de respuesta lineal, donde solo se tienen en cuenta los factores principales (A: Temperatura, B: time, C: cVS), y un modelo de respuesta cuadrático donde se tienen en cuenta tanto los factores principales como sus interacciones (A, B, C, AxA, AxB, AxC, BxB, BxC, CxC), por simplicidad en el modelo se eligió la opción lineal.

Ya que para los ensayos BMP se necesitan 3 réplicas para el análisis de los datos y de error, el resultado obtenido, añadiendo las réplicas de las muestras, es de 27 ejecuciones. Los datos de los parámetros de entrada, temperatura, tiempo y concentración para las 27 ejecuciones de los experimentos se presentan en el ANEXO IV: Experimentos Taguchi.

Una vez realizados los 27 experimentos en el laboratorio (ANEXO IV: Experimentos Taguchi) se procedió a optimizar las variables respuesta siguiendo con el software de Statgraphics (4.4. Optimización experimental de las condiciones de operación de HTI).

3.4 Cálculos

3.4.1. Cálculos relativos al BMP

3.4.1.1. Preparación

Antes de comenzar el montaje de los BMP, es necesario realizar algunos cálculos de preparación y se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

Tabla 3. Parámetros de preparación de BMP

Parámetro	Abreviatura	Valor	Unidades
Volumen del recipiente	$V_{\text{recipiente}}$	160	mL
Volumen de líquido	$V_{\text{líquido}}$	100	mL
Volumen de gas	V_{gas}	60	mL
Ratio S/I lodos	Ratio S/I _{lodos}	0,5	g SV sustrato / g SV inóculo
Volumen de inóculo	$V_{\text{inóculo}}$	40	mL
Masa SV inóculo	$m_{\text{SV inóculo}}$	0,517	g
Densidad	ρ_{lodo}	1000	g/m ³
Constante de gases	R	0,082	atm·L/mol·K
Temperatura	T	35	°C
Presión atmosférica	P_{atm}	760	mmHg

A cada uno de los BMP se añadirá el mismo volumen de inóculo: 40 ml. A partir de este dato y dependiendo de los porcentajes en masa de las muestras que se recogen en la *Tabla 8. Caracterización de lodos*, y de los diferentes parámetros presentados en la *Tabla 3. Parámetros de preparación de BMP*, se determinan las siguientes cantidades de sustancias que se añadirán al recipiente.

$$V_{\text{sustrato } i} = \frac{\text{ratio S/I}_{\text{lodos}} \cdot m_{\text{SV inóculo}}}{\%w_{\text{SV lodo } i} \cdot \rho_{\text{lodo}}} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$V_{\text{agua } i} = V_{\text{líquido}} - (V_{\text{sustrato}} + V_{\text{inóculo}}) \quad \text{Ecuación 2}$$

$$V_{\text{agua } i} = V_{\text{líquido}} - (V_{\text{sustrato}} + V_{\text{inóculo}}) \quad \text{Ecuación 3}$$

$$m_{\text{inóculo}} = V_{\text{inóculo}} \cdot \rho_{\text{lodo}} = 40 \text{ g} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$m_{\text{sustrato } i} = V_{\text{sustrato } i} \cdot \rho_{\text{lodo}} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$m_{\text{agua } i} = V_{\text{agua } i} \cdot \rho_{\text{agua}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Teniendo en cuenta la concentración en masa de sólidos volátiles en cada lodo del experimento (*Tabla 7. Caracterización de lodos antes y después de la HT*) se calculan los gramos de SV añadidos al recipiente:

$$g\ SV_{sustrato\ \text{añadidos}} E_i = m_{sustrato\ i} \cdot \%w_{SV\ lodo\ i} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$g\ SV_{inóculo\ \text{añadidos}} E_i = m_{inóculo\ i} \cdot \%w_{SV\ inóculo} \quad \text{Ecuación 8}$$

Los datos calculados se resumen en la *Tabla 9. Datos de preparación de BMP* que se encuentra en el apartado 4.1.2 Resultados de cálculos relativos al BMP.

3.4.1.2. Producción de metano

Mediante los datos de presión y composición tomados en el laboratorio a lo largo de los 32 días de experimento, de cada BMP por triplicado, (ANEXO I: Datos experimentales) se obtiene la producción de metano a partir de la ecuación general de los gases ideales y considerando condiciones estándar

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad \text{Ecuación 9}$$

$$n_{CH_4\ i} = \frac{P_{CH_4\ i} \cdot V_{gas}}{T \cdot R} = \frac{(P_T + P_{atm})_i \cdot \chi_{CH_4\ i} \cdot V_{gas}}{T \cdot R} \quad \text{Ecuación 10}$$

En el laboratorio se toman datos de presión a lo largo del tiempo, por lo que, con la *ecuación 10* se calcularía la producción, en moles, de metano acumulada hasta el momento. Para conocer la producción diaria, es necesario restar la producción de metano obtenida en la medición anterior:

$$n_{CH_4(t=t)i} = \frac{[P_{T(t=t)i} \cdot \chi_{CH_4(t=t)i} - P_{T(t=t-1)i} \cdot \chi_{CH_4(t=t-1)i}] \cdot V_{gas}}{T \cdot R} \quad \text{Ecuación 11}$$

En condiciones estándar, un mol de cualquier gas ocupa 22,4 L de volumen:

$$V_{CH_4(t=t)i} = n_{CH_4(t=t)i} \cdot 22,4\ L/mol \quad \text{Ecuación 12}$$

Por último, se calcula la productividad bruta acumulada de metano (PB_{CH_4}), para cada experimento, a partir de los datos de volumen de metano acumulado ($V_{CH_4\ \text{acumulado}}$) (ANEXO II: Resultados producción y productividad de metano). Hay que tener en cuenta que el propio fango puede “morir” y generar sustrato, por tanto, para obtener la productividad neta de metano (PN_{CH_4}), es necesario restar la productividad de metano del inóculo (PI_{CH_4}):

$$V_{CH_4 \text{acumulado } i} = V_{CH_4(t=t)} + V_{CH_4(t=t-1)} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$PB_{CH_4 i} = \frac{V_{CH_4 i}}{g \text{ SV}_{\text{añadidos sustrato } E_i}} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$PI_{CH_4 i} = \frac{V_{CH_4 i}}{g \text{ SV}_{\text{añadidos inóculo}}} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$PN_{CH_4 i} = PB_{CH_4} - [PI_{CH_4}] \quad \text{Ecuación 16}$$

Los BMP de cada condición están por triplicado, por lo que a cada dato de PN_{CH_4} se restará el promedio de tres datos, uno de cada BMP de inóculo (Ecuación 16)

Los datos de volúmenes obtenidos y productividad se encuentran en el ANEXO II: Resultados producción y productividad de metano.

3.4.2. Cálculos relativos a la hidrólisis térmica: eliminación de sólidos

A continuación, se calculará el porcentaje de eliminación de sólidos volátiles que tiene lugar durante el proceso de hidrólisis ya que será necesario para posteriores cálculos de los balances de materia.

En la *Tabla 8. Caracterización de lodos*, se puede observar, en porcentaje en masa, la cantidad de sólidos presentes en cada uno de los experimentos. El experimento sin hidrólisis térmica concentrado hasta el 10,8% de sólidos volátiles (en la práctica un 7,299%) se tiene en cuenta como experimento de partida en el que está presente la cantidad total de sólidos volátiles. Los experimentos E1, E2, E3 son los experimentos obtenidos al realizar una hidrólisis térmica en diferentes condiciones a ese primer lodo concentrado. En la *Tabla 7. Caracterización de lodos antes y después de la HT*, se resumen los datos de porcentajes en masa de sólidos volátiles, la masa introducida al reactor de hidrólisis para cada experimento y la masa recogida de cada uno de los experimentos hidrolizados utilizada durante la experimentación en laboratorio para cada experimento por triplicado.

Con estos datos, para calcular el porcentaje de eliminación de sólidos volátiles se utiliza la siguiente ecuación:

$$\%_{elimSV} = \frac{\dot{m}_{SVantesHT} \cdot \dot{m}_{SVdespuésHT}}{\dot{m}_{SVantesHT}} \cdot 100$$

$$= \frac{\dot{m}_{añadida} \cdot (g/kg)_{SVantesHT} - \dot{m}_{recogida} \cdot (g/kg)_{SVdespuésHT}}{\dot{m}_{añadida} \cdot (g/kg)_{SVantesHT}}$$

Los resultados de los porcentajes de eliminación de sólidos volátiles durante el proceso de hidrólisis térmica se recogen en la *Tabla 10. Resumen de % de eliminación de sólidos volátiles en HT* que se encuentra en el apartado 4.1.3 Resultados de cálculos relativos a la HT.

3.5 Bases de cálculo para los balances de materia y energía.

A continuación, se resumen los parámetros necesarios para llevar a cabo los balances de materia y energía, realizados en el apartado 4. Cálculos, a los diferentes escenarios de tratamiento de lodos que más adelante serán comparados.

Tabla 4. Datos de corrientes principales proporcionados por la EDAR de Valladolid

	Q (m ³ /d)	[ST] (kg/m ³)	ST/SV
Lodo primario (LP)	650	15-25	0,75
Lodo secundario (LS)	1500-2000	7	0,75
Lodo espesado (FM2)	-	30-40	-
Lodo deshidratado (BS)	-	200	-

La Tabla 4 muestra los datos de las corrientes principales, necesarios para el cálculo de los balances de materia, que fueron proporcionados por la EDAR de Valladolid.

Tabla 5. Parámetros Digestión Anaerobia [8]

Rendimiento eliminación de SV	45 %
CH ₄ en biogás	65 %
Tasa de producción de biogás por SV eliminado	$0,595 \frac{m^3 CH_4}{kg SV_{eliminado}}$

Tasa de producción de biogás por DQO eliminada	$0,35 \frac{m^3 CH_4}{kg DQO_{eliminada}}$
$\rho_{biogás}$	$1,2 kg/m^3$

En la Tabla 5 se encuentran los parámetros tenidos en cuenta para la digestión anaerobia. Estos parámetros son los valores medios habitualmente utilizados en los cálculos de estos procesos de digestión.

La densidad de todas las corrientes de lodo, al estar compuestas en su mayoría por agua, se supondrá igual a la densidad del agua, por tanto, $\rho_{lodo} = \rho_{agua} = 1000 kg/m^3$.

Tabla 6. Principales parámetros de cogeneración

PCI biogás	6,5 kWh/m ³
Eficiencia eléctrica	38%
Eficiencia térmica	48%
Refrigeración motor	19%
Gases de escape	29%
Pérdidas	14%

En la Tabla 6 se presentan los parámetros principales de cogeneración que se utilizarán para los cálculos de la producción energética en los balances de energía.

4. Resultados y discusión

4.1 Resultados experimentales

Tabla 7. Caracterización de lodos antes y después de la HT

	Antes hidrólisis			Después hidrólisis		
	g/kg	g/kg	kg	g/kg	g/kg	kg
	TS	VS	masa añadida	TS	VS	masa recogida
E1	132,46	72,99	0,5	33	18,2	1,71439
E2	132,46	72,99	0,5	44,94	24,68	1,0008
E3	132,46	72,99	0,5	37,44	20,49	1,33

La Tabla 7. Caracterización de lodos antes y después de la HT recoge los datos de sólidos presentes en las muestras seleccionadas de fango antes y después de la hidrólisis térmica, y también la masa añadida al reactor de hidrólisis y la recogida una vez finalizado el proceso térmico.

A continuación, se presentan los datos de las concentraciones de sólidos, totales y volátiles, así como su porcentaje en masa, de las cinco muestras tomadas para estudio en los ensayos del laboratorio.

Tabla 8. Caracterización de lodos

	sólidos volátiles (SV)		sólidos totales (ST)	
	kg SV / m ³ lodo	%wSV _{lodo i}	kg ST / m ³ lodo	%wST _{lodo i}
Inóculo anaerobio EDAR	12,92	1,29	23,65	2,37
Sin HT - 10,8% E4	72,99	7,30	132,46	13,25
170°C - 25 min - 10,8% E1	18,2	1,82	32,77	3,28
210°C - 5 min - 10,8% E2	24,68	2,47	44,94	4,50
210°C - 8 min - 10,8% E3	20,49	2,05	37,44	3,74

4.2 Resultados de cálculos relativos al BMP

Se presentan, a continuación, las cantidades de sustancias que se añadirán al recipiente y que fueron calculadas en el apartado 3.4.1 Cálculos relativos al BMP.

Tabla 9. Datos de preparación de BMP

		Masa (g)		g SV añadidos
E1	170°C-25min-10.8%	SUSTRATO	14,2	0,26
		INÓCULO	40	0,52
		H2O	54,0	
18,2 g SV/kg				
E2	210°C-5min-10.8%	SUSTRATO	10,5	0,26
		INÓCULO	40,0	0,52
		H2O	49,5	
24,7 g SV/kg				
E3	210°C-8min-10.8%	SUSTRATO	12,6	0,26
		INÓCULO	40,0	0,52
		H2O	47,4	
20,5 g SV/kg				
E4	Sin HT-10.8%	SUSTRATO	3,5	0,26
		INÓCULO	40,0	0,52
		H2O	56,5	
73,0 g SV/kg				
Inóculo		INÓCULO	40,0	0,52
12,92 g SV/kg		H2O	60,0	

4.3 Resultados de cálculos relativos a la HT

Tabla 10. Resumen de % de eliminación de sólidos volátiles en HT

	% eliminación SV en HT
E1	14,50
E2	32,32
E3	25,33

4.4 Optimización experimental de las condiciones de operación de HTI

Una vez realizado el diseño del experimento obteniéndose todas las condiciones de operación, será necesaria su optimización maximizando las variables respuesta, con el fin de obtener las condiciones óptimas a estudiar en el laboratorio.

4.4.1. Optimización

El panel de Optimización muestra los valores de los factores experimentales que maximizan la deseabilidad, usando los modelos de predicción para cada respuesta.

La deseabilidad evalúa cómo una combinación de variables satisface las metas definidas para las respuestas del modelo. Este parámetro se encuentra definido en un rango de valores de 0 a 1, representando el valor máximo, 1, la situación ideal mientras que el valor 0 significaría que alguna de las respuestas está fuera de los límites aceptables.

El resultado del programa fue una deseabilidad en la localización del **óptimo** del 94,45% (0,9445), en la ejecución realizada a **210°C y 45 minutos**, con una predicción de las variables respuesta del 28% de eliminación de sólidos volátiles y una productividad de metano de 247,417 mL CH₄/gSV.

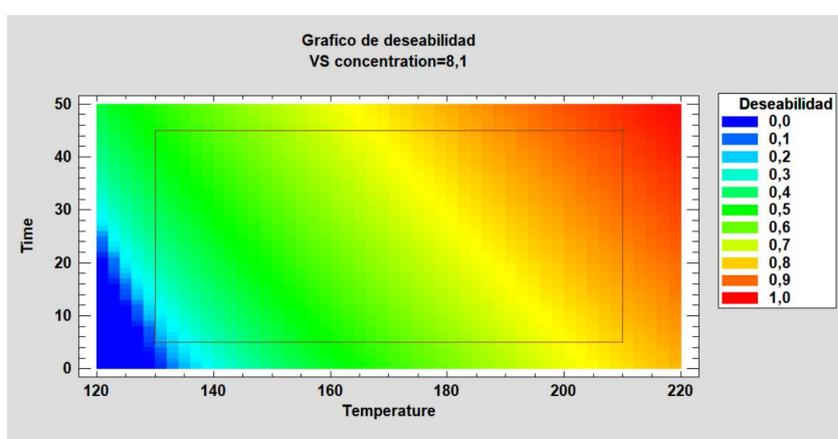


Ilustración 14. Gráfico de deseabilidad para una concentración fijada del 8,1% de sólidos volátiles

Una forma de ver cómo afectan los factores a la deseabilidad es este gráfico de contornos. Se ve cómo a medida que aumentan los factores temperatura y tiempo hacia su nivel más alto, la deseabilidad se va acercando a su valor máximo, 1, es decir la situación ideal. El punto óptimo (+) se puede apreciar para un valor T=210°C y un valor time=45 min.

4.4.2. Análisis del diseño

- Análisis eliminación de sólidos volátiles (VSremoval)

$$VSremoval = -35,2674 + 0,272595T + 0,127633time + 0,0511494 cVS \quad \text{Ecuación 18}$$

$$(T [=] \text{ } ^\circ\text{C}, \text{time} [=] \text{ min}, cTS [=] \text{ mLCH}_4/\text{gSV})$$

La *ecuación 18* es la ecuación del modelo matemático obtenido, es decir, la ecuación de regresión que se ajusta a los datos. Se utiliza para

predecir la respuesta en valores específicos de los factores experimentales.

Statgraphics da un porcentaje de validación del modelo de regresión para esta variable respuesta es de $r^2=92,298 \%$.

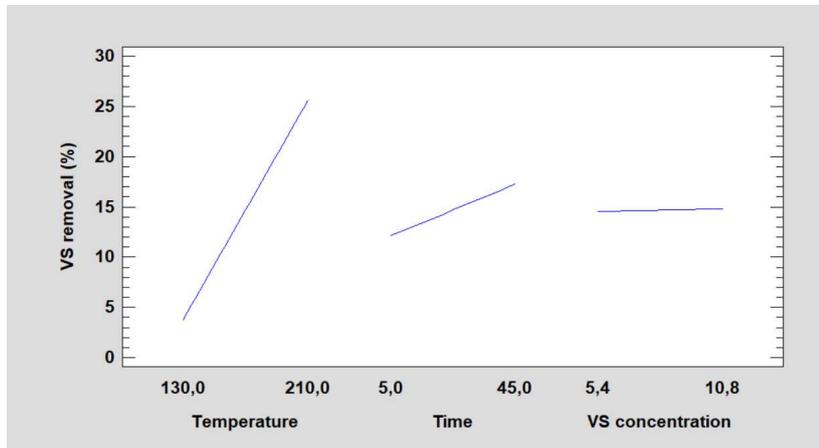


Ilustración 15. Gráfica de Efectos Principales para VS removal

Puesto que es difícil de comprender el modelo de regresión viéndolo en una recta, una manera de simplificarlo es presentar la estimación del modelo mediante una gráfica. La gráfica de efectos principales muestra la respuesta predicha cuando cada uno de los factores cambia de su nivel bajo al alto.

Se ve cómo al aumentar la temperatura y aumentar el tiempo, también aumenta la eliminación de sólidos volátiles, siendo la pendiente de la recta de temperatura mayor. Esto explica también la representación del diagrama de Pareto donde se puede ver que la temperatura es un factor más importante sobre la eliminación de sólidos volátiles. En cuanto a la concentración de sólidos volátiles, el factor ruido, se observa como la eliminación de sólidos volátiles permanece casi constante al pasar la concentración de su nivel bajo al alto.

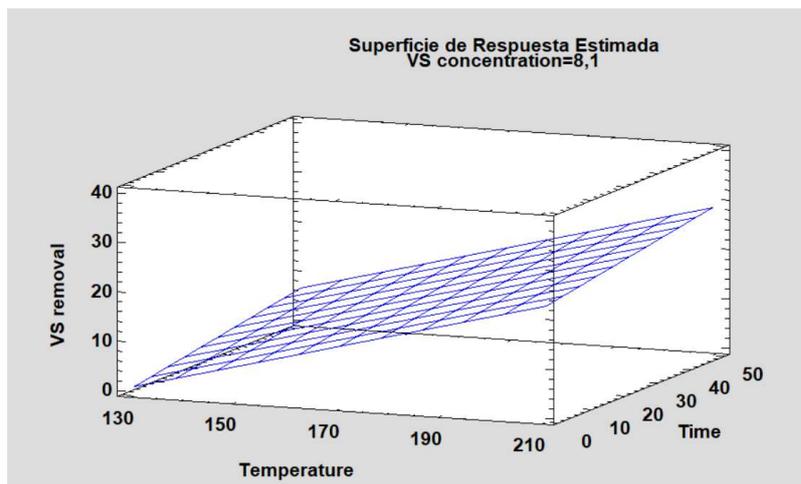


Ilustración 16. Gráfico de superficie de respuesta para VS removal

Otra manera de ver fácilmente cómo actúan los dos efectos principales más importantes sobre la variable respuesta es el gráfico de superficie de respuesta. Se observa la eliminación de sólidos volátiles como función de la temperatura y el tiempo para un valor medio de concentración de 8,1 % de sólidos volátiles.

Tabla 11. Efectos estimados para VS removal (%)

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
promedio	14,679	0,550801	
A:Temperature	21,8076	1,34918	1,0
B:Time	5,10531	1,34918	1,0
C:VS concentration	0,276207	1,34918	1,0

La Tabla 11. Efectos estimados para VS removal (%), dada por el software Statgraphics, muestra el valor estimado, el error estándar y el factor de inflación de la varianza de cada factor de la regresión (T, time, VSremoval). El estimado de cada factor es la diferencia entre la respuesta del nivel alto y bajo de un factor cuando el resto de los factores se fijan en los valores centrales. El error estándar indica la diferencia entre los valores reales y los estimados. El factor de inflación de la varianza (variance inflation factor, VIF) indica en qué medida la varianza de cada coeficiente de regresión estimado aumenta en comparación con un contexto perfectamente ortogonal donde las variables son linealmente independientes. Cuando el VIF es superior a 10 se interpreta como un indicativo de confusión seria entre los efectos de la regresión. Como se muestra a continuación, el diseño realizado es perfectamente ortogonal tomando el factor de inflación el valor mínimo igual a 1.

Tabla 12. Análisis de Varianza para VS removal. Análisis ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperature	2140,08	1	2140,08	261,26	0,0000
B:Time	117,289	1	117,289	14,32	0,0010
C:VS concentration	0,343305	1	0,343305	0,04	0,8396
Error total	188,4	23	8,19132		
Total (corr.)	2446,11	26			

La tabla ANOVA divide la variabilidad de la variable respuesta “VS removal” en estadísticos separados para cada uno de los efectos. Para el análisis de la significancia de cada efecto, Statgraphics plantea un contraste de hipótesis. Una “hipótesis nula” que implica que cada el coeficiente del efecto a estudio es igual a 0, que será rechazada en favor de una “hipótesis alternativa” en la que el valor del coeficiente será diferente de 0, si el valor-P es menor que el nivel de significación ($\alpha=0,05$).

La suma de cuadrados mide el incremento sobre la varianza del error experimental si cada término fuera eliminado por separado del modelo.

El estadístico F, o estadístico de Fisher, prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio frente a un estimado del error experimental (cuadrado medio del error total).

El término cuadrado medio es simplemente una estimación de la varianza de los datos y se obtiene dividiendo la suma de cuadrados entre el término Gl que corresponde a los grados de libertad de cada efecto.

Para poder validar el estadístico F se necesita comparar con la tabla de Fisher, por tanto, existe otro estadístico, el valor-P, más eficiente y rápido. En este caso, 2 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0 % ($\alpha=1$). La temperatura y el tiempo son los parámetros significativos estadísticamente, excluyéndose la concentración de sólidos volátiles.

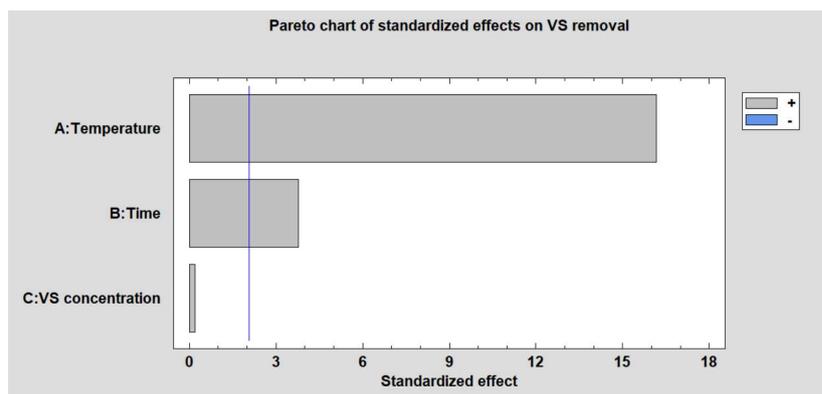


Ilustración 17. Diagrama estandarizado de Pareto para VS removal

El Diagrama de Pareto grafica los valores absolutos de cada efecto y representa la importancia de los efectos sobre la variable respuesta. El color de los rectángulos determina si un efecto es positivo o negativo. Se observa que la temperatura y el tiempo tienen una gran importancia sobre la eliminación de sólidos volátiles, aunque el efecto de la temperatura es cuatro veces superior al del tiempo

La línea vertical azul determina cuáles de los efectos son significativos estadísticamente en el nivel de significancia especificado ($\alpha=0,05$), siéndolo aquellos que la traspasan, es decir, la temperatura y el tiempo, coincidiendo con el análisis ANOVA.

- Análisis producción de metano (BMP)

$$BMP = 122,444 + 0,485931 T + 0,633138 \text{ time} + 0,437791 cVS \quad \text{Ecuación 19}$$

$$(T [=] \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ time [=] min, } cTS [=] \text{ mLCH}_4/\text{gSV})$$

La ecuación 19 es la ecuación de regresión que se ajusta a los datos para la variable respuesta producción de metano.

Statgraphics da un porcentaje de validación del modelo de regresión para esta variable respuesta es de $r^2=77,6562 \%$.

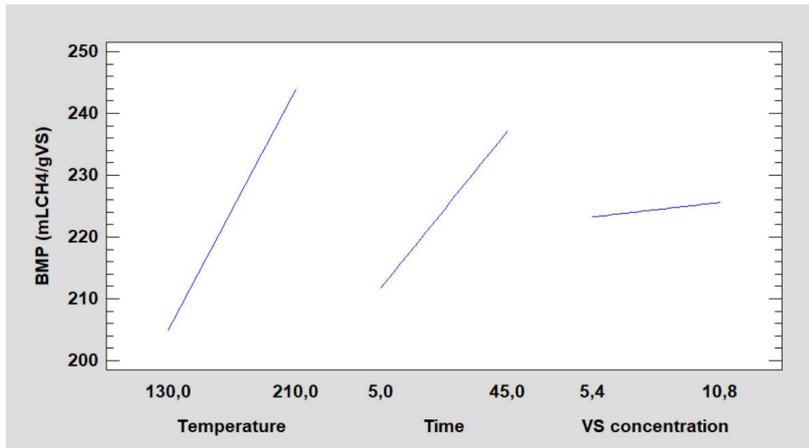


Ilustración 18. Gráfica de Efectos Principales para BMP

En cuanto a la producción de metano, se observa cómo el efecto de la temperatura y el tiempo no difieren tanto sobre esta variable respuesta y cómo la eliminación de sólidos volátiles no se mantiene tan constante al pasar la concentración de sólidos volátiles del nivel bajo al alto.

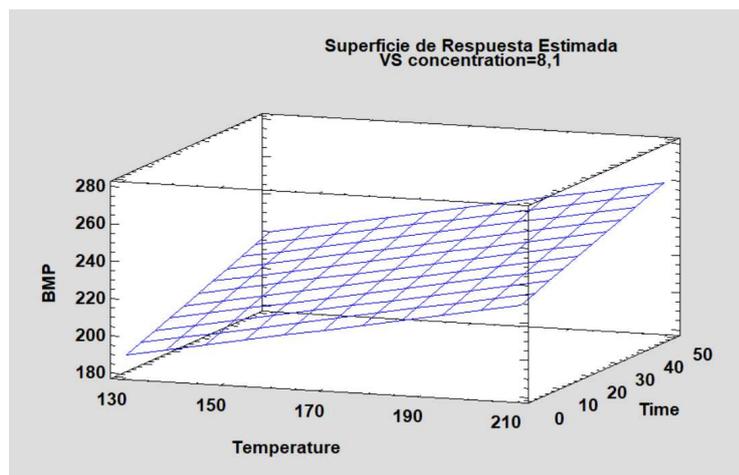


Ilustración 19. Gráfico de superficie de respuesta para BMP

En este gráfico de superficie de respuesta se observa la producción de metano como función de la temperatura y el tiempo para un valor medio de concentración de 8,1 % de sólidos volátiles. Se puede ver cómo la pendiente del efecto del tiempo es mayor que en el gráfico de superficie de respuesta de la eliminación de sólidos volátiles.

Tabla 13. Efectos estimados para BMP (mLCH4/gVS)

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
promedio	224,426	2,12127	
A:Temperature	38,8745	5,19604	1,0
B:Time	25,3255	5,19604	1,0

C:VS concentration	2,36407	5,19604	1,0
--------------------	---------	---------	-----

Al igual que para la anterior variable respuesta, la tabla de efectos muestra un modelo perfectamente ortogonal, siendo los efectos independientes entre sí. Cabe destacar que los valores error estándar y estimado son mayores que para la eliminación de sólidos volátiles, lo que explica el menor porcentaje de validación del modelo de regresión.

Tabla 14. Análisis de Varianza para BMP. Análisis ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperature	6800,52	1	6800,52	55,97	0,0000
B:Time	2886,22	1	2886,22	23,76	0,0001
C:VS concentration	25,1497	1	25,1497	0,21	0,6534
Error total	2794,38	23	121,495		
Total (corr.)	12506,3	26			

En este caso, el análisis ANOVA también explica que los mismos 2 efectos, la temperatura y el tiempo, tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de 0 con un nivel de confianza del 95,0%.

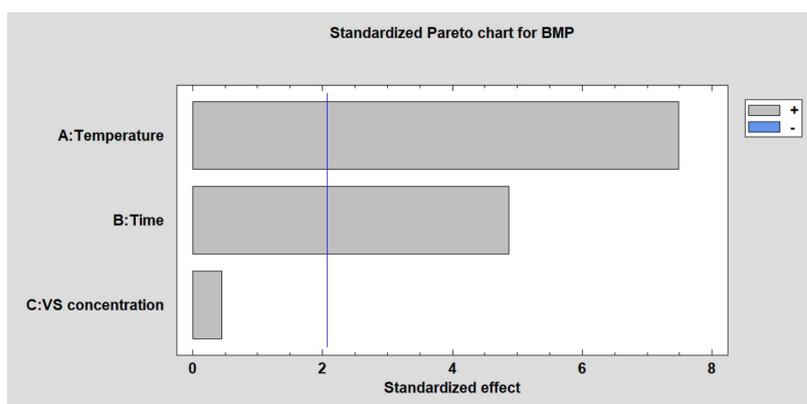


Ilustración 20. Diagrama estandarizado de Pareto para "BMP"

Para la producción de metano, los efectos importantes que actúan sobre la variable son también la temperatura y el tiempo, dejando fuera a la concentración de sólidos volátiles. Sin embargo, a diferencia de la variable eliminación de sólidos volátiles, aquí el tiempo tiene mucha más relevancia. En cuanto a los efectos estadísticamente significativos, también coincidiendo con su análisis ANOVA, se encuentran el tiempo y la temperatura.

[45]

4.5 Análisis del proceso de tratamiento de lodos

Se procederá al estudio comparativo de los balances de materia y energía para tres situaciones: el proceso convencional de tratamiento de los lodos mediante digestión anaerobia, el proceso de tratamiento introduciendo una hidrólisis térmica entre dos etapas de digestión anaerobia, y el proceso eliminando la hidrólisis térmica (sin HT) con el fin de comparar numéricamente las opciones y poder tomar decisiones.

4.5.1. Balances de materia y energía al proceso convencional de digestión anaerobia (CDA)

El proceso convencional de tratamiento de lodos de la estación depuradora de aguas residuales de Valladolid se tratará como el escenario base.

4.5.1.1. Balance de materia

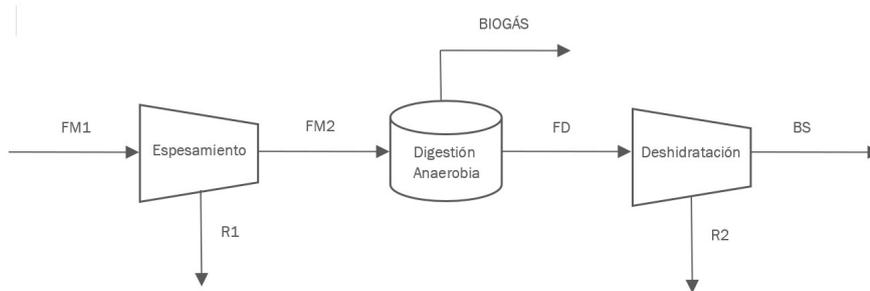


Ilustración 21. Proceso convencional de digestión de lodos de la EDAR de Valladolid

En la EDAR se introduce un caudal de fango mixto (FM1) a un proceso de centrifugación con el fin de espesarlo y así aumentar la concentración de sólidos para un mejor rendimiento de la posterior digestión anaerobia. De esta etapa de espesamiento se obtiene el fango mixto espesado (FM2) y una corriente compuesta en su mayoría por el agua eliminada durante la centrifugación que será recirculada a la línea de aguas (R1).

El fango mixto espesado (FM2) es bombeado hasta los digestores anaerobios donde se producirá la digestión a 35°C durante 30 días obteniendo una corriente de biogás (BIOGÁS) y un fango digerido (FD) que será posteriormente deshidratado dando lugar a una corriente de agua (R2) que se recirculará también a la línea de aguas y obteniendo finalmente el fango deshidratado o biosólido.

Conocido el caudal de lodo primario (LP) y lodo secundario (LS), se realiza un balance de materia al punto de mezcla de estas dos corrientes.

$$\dot{m}_{FM1} = \dot{m}_{LP} + \dot{m}_{LS} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$\dot{m}_i = \dot{Q}_i \cdot \rho_{lodo} \quad \text{Ecuación 21}$$

$$\dot{m}_i = \dot{m}_{i_{agua}} + \dot{m}_{i_{ST}} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$\dot{m}_{i_{ST}} = [ST]_i \cdot \dot{Q}_i \quad \text{Ecuación 23}$$

$$\dot{m}_{i_{ST}} = \dot{m}_{i_{SV}} + \dot{m}_{i_{SF}} \quad \text{Ecuación 24}$$

$$\dot{m}_{i_{SV}} = \frac{ST_i}{SV_i} \cdot \dot{m}_{i_{ST}} \quad \text{Ecuación 25}$$

Por tanto, la corriente FM1:

$$\dot{m}_{FM1_{ST}} = \dot{m}_{LP_{ST}} + \dot{m}_{LS_{ST}} \quad \text{Ecuación 26}$$

$$\dot{m}_{FM1_{agua}} = \dot{m}_{LP_{agua}} + \dot{m}_{LS_{agua}} \quad \text{Ecuación 27}$$

$$\dot{m}_{FM1} = 2.450.000 \text{ kg/d} \quad \text{Ecuación 28}$$

Se tienen ya todos los datos de flujo total de las corrientes LP, LS, FM1 (\dot{m}_{LP} , \dot{m}_{LS} , \dot{m}_{FM1}) y sus correspondientes flujos de sólidos totales, sólidos volátiles y sólidos fijos. A continuación, para caracterizar completamente todas las corrientes se calculan los porcentajes de composición de agua y de sólidos totales de cada una de ellas y la concentración de sólidos totales de la corriente FM1 para posteriores cálculos.

$$\%ST_i = \frac{\dot{m}_{i_{ST}}}{\dot{m}_i} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 29}$$

$$\%agua_i = \frac{\dot{m}_{i_{agua}}}{\dot{m}_i} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 30}$$

$$[ST]_i = \frac{\dot{m}_{i_{ST}}}{\dot{Q}_i} \quad \text{Ecuación 31}$$

Se conoce la concentración de sólidos totales de la corriente FM2 ($[ST]_{FM2} = 35 \text{ kg/m}^3$), por tanto, considerando que todos los sólidos de la corriente FM1 van

a permanecer en FM2 ya que por la corriente de recirculación R1 solo se va agua, se calcula el caudal y el flujo másico de FM2:

$$\dot{Q}_{FM1} \cdot [ST_{FM1}] = \dot{Q}_{FM2} \cdot [ST_{FM2}] \quad \text{Ecuación 32}$$

$$\dot{m}_{FM1SV} = \dot{m}_{FM2SV} \quad \text{Ecuación 33}$$

$$\dot{Q}_{FM2} = 731 \text{ m}^3/d$$

$$\dot{m}_{FM2} = 731.429 \text{ kg/d}$$

Con los datos de caudal, flujo másico y concentración de sólidos totales de la corriente FM2 se calcula, con la *Ecuación 23* el flujo másico de sólidos totales, con la *Ecuación 24* el flujo de sólidos fijos que posteriormente será necesario, y los porcentajes másicos de sólidos totales y agua con las *ecuaciones 29 y 30* respectivamente.

En la digestión anaerobia se produce una eliminación de sólidos volátiles del 45%, permaneciendo en la corriente FD el 55% de estos sólidos. Sin embargo, el flujo másico de sólidos fijos y el flujo másico de agua de la corriente FM2 permanecerá constante en FD.

$$\dot{m}_{FDsv} = (1 - 0,45) \cdot \dot{m}_{FM2sv} \quad \text{Ecuación 34}$$

$$\dot{m}_{FM2sf} = \dot{m}_{FDsf} \quad \text{Ecuación 35}$$

$$\dot{m}_{FM2agua} = \dot{m}_{FDagua} \quad \text{Ecuación 36}$$

Con la *Ecuación 24* se calcula el flujo másico de sólidos totales de la corriente FD, con la *Ecuación 22* el flujo total y el caudal mediante la *Ecuación 21*. Se tienen ya, por tanto, todos los datos y al igual que para las anteriores corrientes, se calculan los porcentajes másicos de FD.

A continuación, se calcula el flujo de biogás generado. Se cuenta con el dato de la bibliografía de una producción de 0,595 m³CH₄ por cada kg de sólido volátil eliminado y también con la tasa de eliminación de sólidos volátiles en la digestión anaerobia.

$$\dot{m}_{sv\text{eliminados}} = 0,45 \cdot \dot{m}_{FM2sv} \quad \text{Ecuación 37}$$

$$\dot{Q}_{CH_4} = \frac{0,595 m^3 CH_4}{kg SV eliminados} \cdot \dot{m}_{SV eliminados} = 5.141 m^3/d \quad \text{Ecuación 38}$$

El biogás está formado por un 65% de metano, por tanto, se calcula el caudal de la corriente BIOGÁS:

$$\dot{Q}_{BIOGÁS} = \frac{\dot{Q}_{CH_4}}{0,65} = 7.909 m^3/d \quad \text{Ecuación 39}$$

$$\dot{m}_{BIOGÁS} = \dot{Q}_{BIOGÁS} \cdot \rho_{biogás} = 9.491 kg/d \quad \text{Ecuación 40}$$

Por último, se procede al cálculo de la corriente de lodo deshidratado o biosólido (BS) de la que se conoce su concentración de sólidos volátiles y se cumple la *ecuación 41* ya que todos los sólidos que estaban presentes en la corriente de lodo digerido permanecerán en la corriente BS.

$$\dot{Q}_{FD} \cdot [ST_{FD}] = \dot{Q}_{BS} \cdot [ST_{BS}] \quad \text{Ecuación 41}$$

Se calcula la concentración de sólidos totales de la corriente FD mediante la *ecuación 31* y se obtiene finalmente el caudal de BS:

$$\dot{Q}_{BS} = 85 m^3/d$$

Mediante la *ecuación 21* calculamos el flujo másico de lodo deshidratado:

$$\dot{m}_{BS} = 84.800 kg/d$$

Al igual que para las corrientes anteriores se caracteriza a través del cálculo de los porcentajes másicos de sólidos totales, agua y ratio ST/SV.

Las corrientes de recirculación se obtienen mediante un balance de materia primero al espesamiento (R1) y luego a la deshidratación (R2) considerando que solo contienen agua.

$$\dot{m}_{R1} = \dot{m}_{FM1} - \dot{m}_{FM2} \quad \text{Ecuación 42}$$

$$\dot{m}_{R2} = \dot{m}_{FD} - \dot{m}_{BS} \quad \text{Ecuación 43}$$

Tabla 15. Tabla resumen de las corrientes del escenario CDA

	flujo	caudal	ST	H2O	SV	SF
	kg/d	m3/d	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d
LP	650.000	650	13.000	637.000	9.750	3.250
LS	1.800.000	1.800	12.600	1.787.400	9.450	3.150
FM1	2.450.000	2.450	25.600	2.424.400	19.200	6.400
FM2	731.429	731	25.600	705.829	19.200	6.400
FD	722.789	723	16.960	705.829	10.560	6.400
BS	84.800	85	16.960	678.40	10.560	6.400
R1	1.718.571	1.719	-	1.718.571	-	-
R2	637.989	638	-	637.989	-	-

Tabla 16. Tabla resumen de % máxicos de las corrientes del escenario CDA

	%ST	%H2O	SV/ST
LP	2	98	0,75
LS	0,70	99,30	0,75
FM1	1,04	98,96	0,75
FM2	3,50	96,50	0,75
FD	2,35	97,65	0,62
BS	20	80	0,62
R1	-	100	-
R2	-	100	-

Tabla 17. Producción de biogás en el escenario CDA

	flujo	caudal	CH4	CH4
	kg/d	m3/d	kg/d	m3/d
BG	9.490	7.909	6.169	5.141

4.5.1.2. Balance de energía

Para el balance de energía es necesario conocer la energía eléctrica consumida por los diferentes equipos que realizan las operaciones durante el proceso de depuración, así como la energía térmica empleada en el calentamiento del lodo hasta los 35°C necesarios para el proceso de digestión, y la energía generada en forma de biogás durante dicha digestión anaerobia.

El consumo eléctrico se produce en la etapa de espesamiento, en la deshidratación final y durante la agitación del lodo en el proceso de digestión.

Se han encontrado valores promedio de la potencia consumida de los diferentes equipos clave, además de los parámetros técnicos de la cogeneración.

DESHIDRATACIÓN Y ESPESAMIENTO

El equipo empleado en la concentración de los lodos es un decantador centrífugo. La potencia consumida por este equipo depende de la capacidad de éste, por tanto, para la elección de la centrífuga es necesario tener en cuenta el caudal a tratar en las dos etapas de concentración (\dot{Q}_{FM1} , \dot{Q}_{FD}). Sin embargo, en la EDAR de Valladolid, en la etapa de espesamiento, el caudal total \dot{Q}_{FM1} se divide en cinco partes iguales que son bombeadas hasta cinco centrífugas mientras que el caudal a tratar durante la deshidratación \dot{Q}_{FD} se separa y bombea hacia tres centrífugas.

Deshidratación de lodos – los Decanters OSE de Flottweg

Datos técnicos de los Decanters Flottweg OSE*							
Modelo	C2E-4	C3E-4	C4E-4	C5E-4	C7E-4	C8E-4	Z92-4
Materiales de construcción	Todas las partes en contacto con el producto son fabricadas en acero anticorrosivo e inoxidable de alta calidad, p.ej. 1.4463 (Duplex) y 1.4571 (AISI 316Ti).						
Dimensiones (L, AN, A)	2700 x 840 x 800 mm	2980 x 940 x 890 mm	3520 x 1140 x 1030 mm	4070 x 1520 x 1210 mm	4800 x 1720 x 1390 mm	5910 x 2000 x 1470 mm	5910 x 2770 x 1730 mm
Peso bruto	1400 kg	1765 kg	2760 kg	5030 kg	8200 kg	13070 kg	18000 kg
Potencia del motor Accionamiento del tambor	5,5 – 7,5 kW	7,5 – 15 kW	15 – 30 kW	30 – 55 kW	55 – 110 kW	75 – 132 kW	90 – 200 kW
Potencia del motor Accionamiento del tornillo Simp Drive® Flottweg	2,2 kW	4 kW	4 kW	5,5 kW	5,5 kW	5,5 kW	7,5 kW
Capacidad	8 – 15 m ³ /h	15 – 30 m ³ /h	30 – 60 m ³ /h	45 – 90 m ³ /h	70 – 140 m ³ /h	100 – 200 m ³ /h	120 – 250 m ³ /h

* Los datos mencionados son valores orientativos. La capacidad real depende de las características del producto a tratar. Se reservan modificaciones técnicas.

Ilustración 22. Datos técnicos de los Decanters Flottweg OSE [46]

Espesamiento:

$$\dot{Q}_{FM1/5} = 20,42 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow \text{DF OSE C3E-4} \rightarrow P_{\text{espesamiento}_{1/5}} = 16 \text{ KW}$$

$$P_{\text{espesamiento total}} = P_{\text{espesamiento}_{1/5}} \cdot 5 = 80 \text{ KW}$$

Ecuación 44

Deshidratación:

$$\dot{Q}_{FD1/3} = 10,04 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow \text{DF OSE C2E-4} \rightarrow P_{\text{deshidratación}_{1/3}} = 8,7 \text{ KW}$$

$$P_{deshidratación\ total} = P_{deshidratación\ 1/3} \cdot 3 = 26,1\ KW \quad \text{Ecuación 45}$$

AGITACIÓN

La digestión anaerobia se produce en tres reactores de 6.000 m³. Los agitadores de baja velocidad Flyght 4410 de Xylem dan una estimación de la energía consumida durante la agitación del lodo en la digestión ya que son ideales para su uso en depósitos de generación de biogás.

El rango de potencia en el eje de los agitadores Flyght es de 0,9 a 2,6 KW, por lo que se escogerá para los cálculos un valor de $P_{agitador} = 1,5\ KW$. [47]

Como los reactores son de un volumen muy alto, se colocarán dos agitadores a lo largo de reactor de forma vertical, por lo que la potencia consumida en cada reactor será $P_{agitación\ reactor} = 3\ KW$, y la potencia total:

$$P_{agitación\ total} = P_{agitación\ reactor} \cdot 3 = 9\ KW \quad \text{Ecuación 46}$$

La potencia total consumida durante el proceso de depuración de aguas residuales urbanas mediante el método convencional de digestión anaerobia, por tanto, será la suma de todas las potencias consumidas por los equipos principales.

$$P_{ELÉCTRICA\ CONSUMIDA\ CDA} = P_{agitación\ total} + P_{deshidratación\ total} + P_{espesamiento\ total} \quad \text{Ecuación 47}$$

$$P_{ELÉCTRICA\ CONSUMIDA\ CDA} = 115,1\ KW$$

En una hora se consumen 115,1 KWh de energía, por lo que en un año el consumo energético de los equipos principales del tratamiento de lodos de la EDAR será de 1.008.276 KWh.

$$E_{ELÉCTRICA\ CONSUMIDA\ CDA} = 1.008.276\ KWh/año$$

CALENTAMIENTO

El lodo espesado que entrará al proceso de digestión anaerobia (corriente FM2) debe ser calentado, desde la temperatura ambiente de 15°C hasta los 35°C produciéndose así un consumo de energía térmica.

Ya que el lodo tiene un porcentaje de agua muy elevado, para los cálculos, al igual que en los balances de materia, se supondrá que las propiedades de este son iguales a las del agua a 1 atm y a la temperatura media (20°C).

$$C_{p_{lodo}}(20^{\circ}C, 1atm) = C_{p_{agua}}(20^{\circ}C, 1atm) = 4,1841 \frac{KJ}{Kg^{\circ}C} \quad [48]$$

$$E_{Calentamiento_{CDA}} = \dot{m}_i \cdot C_{p_{lodo}} \cdot (\Delta T) \quad \text{Ecuación 48}$$

El flujo másico utilizado será \dot{m}_{FM2}

$$E_{Calentamiento_{CDA}} = \dot{m}_{FM2} \cdot 4,1841 \cdot (35 - 15) = 2.550.309 \text{ KJ/h}$$

$$1KJ/h = 0,0002778 \text{ KWh} \quad \text{Ecuación 49}$$

$$E_{Calentamiento_{CDA}} = 708 \text{ KWh}$$

La energía térmica consumida durante el proceso convencional de digestión anaerobia es únicamente la consumida en el calentamiento.

$$E_{TÉRMICA CONSUMIDA CDA} = 6.205.751 \text{ KWh/año}$$

DIGESTIÓN ANAEROBIA

En la digestión anaerobia se genera biogás, fuente de energía utilizada principalmente en sistemas de cogeneración generando energía térmica y eléctrica para abastecimiento propio y para inyección a la red eléctrica.

$$E_{generada_{BIOGÁS}} = PCI_{BIOGÁS} \cdot \dot{Q}_{BIOGÁS} = 2.142 \text{ KWh}$$

Tabla 18. Desglose de la energía generada para cogeneración en el escenario CDA

	KWh
EF eléctrica	814
EF térmica	1028
Refrigeración motor	407
Gases de escape	621
Pérdidas	300

La energía eléctrica y térmica son utilizadas para abastecimiento propio de las principales operaciones de la planta. Sin embargo, la energía eléctrica que no se utiliza es vendida obteniéndose beneficios económicos.

Tabla 19. Resumen balance de energía para el escenario CDA

	KWh	KWh/año
TOTAL ENERGÍA ELÉCTRICA CONSUMIDA	115,1	1.008.276
	KWh	KWh/año
TOTAL ENERGÍA ELÉCTRICA ABASTECIMIENTO	814	7.130.290
	KWh	KWh/año
TOTAL ENERGÍA TÉRMICA CONSUMIDA	708	6.205.751
	KWh	KWh/año
TOTAL ENERGÍA TÉRMICA ABASTECIMIENTO	1028	9.006.682

Se puede observar que se logra suplir con creces las necesidades energéticas, tanto térmicas como eléctricas, de la planta durante el proceso CDA además de tener energía eléctrica de sobra para inyectar a la red y así obtener un beneficio económico.

4.5.2. Balances de materia y energía al proceso con Hidrólisis Térmica Intermedia (HTI)

A partir del escenario base de tratamiento convencional anaerobio de los lodos, se implementa una etapa de hidrólisis intermedia. Este proceso de tratamiento es el estudiado en este Trabajo de Fin de Grado.

En el trabajo en laboratorio, la hidrólisis térmica se realiza para 3 experimentos en diferentes condiciones con el fin de compararlas y obtener las condiciones óptimas de trabajo.

En la *Tabla 10. Resumen de % de eliminación de sólidos volátiles en HT* se encuentran los porcentajes de eliminación de sólidos volátiles en el proceso de hidrólisis térmica que se necesitarán para el cálculo del balance de materia de este escenario de hidrólisis térmica intermedia.

También se cuenta con los datos experimentales de producción de metano acumulada obtenidos en el laboratorio al final de los 32 días de experimento. Para cada BMP por triplicado se calcula un valor promedio:

Tabla 20. Producción acumulada de biogás y CH₄

	m ³ CH ₄ /kg SV alimentado	m ³ Biogás/kg SV alimentado
170°C 25min 10.8% - E1	0,17	0,26
210°C 5min 10.8% - E2	0,18	0,27
210°C 8min 10.8% - E3	0,19	0,28
Sin HT - E4	0,07	0,09

Para la realización de los balances serán necesarias las concentraciones de sólidos totales y sólidos volátiles de cada experimento, obtenidas experimentalmente en el laboratorio, que caracterizan cada corriente:

Tabla 21. Concentraciones de las corrientes antes y después de la hidrólisis

		[ST]	[SV]
		kg/m ³	kg/m ³
FD2	Sin HT - E4	132,46	72,99
FH	170°C 25min - E1	32,77	18,2
	210°C 5min - E2	44,94	24,68
	210°C 8min - E3	37,44	20,49

Por último, será necesario contar con los datos de DQO total y soluble obtenidos en el laboratorio del fango digerido proveniente de la EDAR (inóculo) y de las corrientes hidrolizadas:

Tabla 22. Datos DQO

	DQO total	DQO soluble
	m ³ /kg	m ³ /kg
Inóculo (FD1)	18,91	1,31
E1	26,86	10,59
E2	37,81	13,84
E3	27,81	10,59

4.5.2.1. Balance de materia

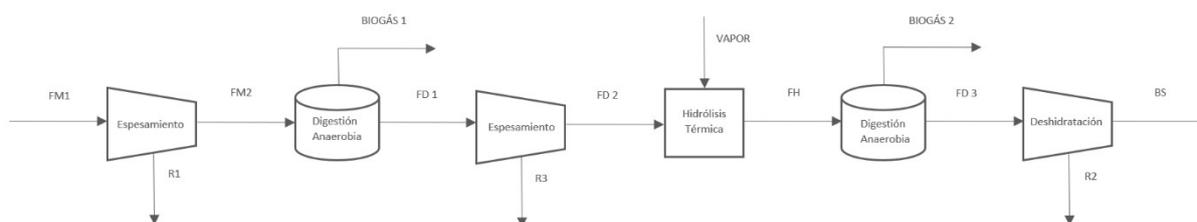


Ilustración 23. Proceso de tratamiento de lodos de EDAR con una etapa de hidrólisis térmica intermedia

El fango digerido mediante el proceso convencional de digestión (FD1) se somete a un segundo espesamiento con el fin de conseguir una corriente de fango con mayor concentración de sólidos (FD2) y así evitar un desperdicio de energía durante el proceso de hidrólisis térmica. La corriente de agua obtenida durante el proceso anterior (R3) se recircula a la línea de aguas. Los sustratos hidrolizados térmicamente (FH) se someten a una segunda digestión de la que

se obtiene una segunda corriente de biogás (BIOGÁS2). El digestato (FD3) es deshidratado obteniéndose el biosólido final (BS) y una recirculación a la línea de aguas (R4).

Las corrientes iniciales: FM1, FM2, R1, BIOGÁS1 y FD1 serán las mismas que en el escenario anterior.

Para el cálculo de la corriente FD2, se cumple:

$$\dot{Q}_{FD1} \cdot [ST_{FD1}] = \dot{Q}_{FD2} \cdot [ST_{FD2}] \quad \text{Ecuación 50}$$

$$\dot{m}_{FD1SV} = \dot{m}_{FD2SV} \quad \text{Ecuación 51}$$

Por tanto,

$$\dot{Q}_{FD} = 128 \text{ m}^3/\text{d}$$

Y mediante la *Ecuación 21* se calcula el flujo másico:

$$\dot{m}_{FD} = 128.039 \text{ kg/d}$$

Con la *Ecuación 23* se calcula el flujo másico de sólidos totales en FD2 y con la *ecuación 22* el flujo de agua. Con todos estos datos de la corriente de lodo digerido espesado se obtienen los porcentajes másicos de agua y de sólidos totales haciendo uso de las *ecuaciones 29 y 30*.

La corriente de fango hidrolizado (FH) se calcula haciendo uso de la *Tabla 10. Resumen de % de eliminación de sólido volátiles en FH*. A partir de aquí para cada corriente se compararán tres resultados (E_i : E1, E2, E3) que serán diferentes para cada condiciones de hidrólisis.

$$\dot{m}_{FHSV_{E_i}} = (1 - \% \text{ eliminación SV})_{E_i} \cdot \dot{m}_{FD2SV} \quad \text{Ecuación 52}$$

Ya que se conoce la concentración de sólidos volátiles y el flujo másico de estos de la corriente FH, mediante la *Ecuación 31* se obtiene el caudal de fango hidrolizado \dot{Q}_{FH} , y su flujo másico utilizando la *Ecuación 21*.

$$\dot{m}_{FHE1} = 439.016 \text{ kg/d}$$

$$\dot{m}_{FHE2} = 323.748 \text{ kg/d}$$

$$\dot{m}_{FHE3} = 389.951 \text{ kg/d}$$

Como se conoce el caudal y la concentración de sólidos totales de la corriente FH, se calcula el flujo másico de sólidos totales haciendo uso de la *Ecuación 23* y el flujo de sólidos fijos mediante la *Ecuación 24* ya que será necesario para el cálculo de la corriente de fango digerido (FD3). Se tienen todos los datos para poder caracterizar la corriente calculando los porcentajes másicos de sus componentes.

A continuación, se calcula el flujo de biogás generado (BIOGÁS 2). Se cuenta con los datos experimentales de producción de biogás y de metano por cada kg de sólido volátil alimentado (*Tabla 20. Producción acumulada de biogás y CH₄*)

$$\dot{Q}_{CH_4Ei} = x_{Ei} \frac{m^3 CH_4}{kg SV \text{ alimentado}} \cdot \dot{m}_{SV_{Ei} \text{ alimentado}} \quad \text{Ecuación 53}$$

$$\dot{Q}_{CH_4E1} = 1.391 \text{ m}^3/d$$

$$\dot{Q}_{CH_4E2} = 1.163 \text{ m}^3/d$$

$$\dot{Q}_{CH_4E3} = 1.358 \text{ m}^3/d$$

$$\dot{Q}_{BIOGÁS 2Ei} = y_i \frac{m^3 \text{ biogás}}{kg SV \text{ alimentado}} \cdot \dot{m}_{SV_{Ei} \text{ alimentado}} \quad \text{Ecuación 54}$$

$$\dot{Q}_{BIOGÁS 2E1} = 2.069 \text{ m}^3/d$$

$$\dot{Q}_{BIOGÁS 2E2} = 1.697 \text{ m}^3/d$$

$$\dot{Q}_{BIOGÁS 2E3} = 1.977 \text{ m}^3/d$$

Con la *Ecuación 21* se calculan los flujos másicos:

$$\dot{m}_{CH_4E1} = 1.670 \text{ kg/d}$$

$$\dot{m}_{CH_4E2} = 1.396 \text{ kg/d}$$

$$\dot{m}_{CH_4E3} = 1.630 \text{ kg/d}$$

$$\dot{m}_{BIOGÁS\ 2_{E1}} = 2.483\text{ kg/d}$$

$$\dot{m}_{BIOGÁS\ 2_{E2}} = 2.036\text{ kg/d}$$

$$\dot{m}_{BIOGÁS\ 2_{E3}} = 2.373\text{ kg/d}$$

En la segunda etapa de digestión no es correcto el dato del rendimiento de eliminación del 45% utilizado para el escenario CDA ya que lo que se busca durante la investigación en el laboratorio es la maximización de este rendimiento de eliminación de sólidos volátiles obtenido en el escenario HTI.

Por tanto, para el cálculo de la corriente FD3 será necesario el uso de los datos de DQO obtenidos experimentalmente (Tabla 22. Datos DQO).

Tenemos caracterizada la concentración de DQO en la corriente FD1 y FH. El flujo másico de DQO total de la corriente FD2 será el mismo que en FD1 ya que en R3 solo se elimina agua. Haciendo uso de estos datos se calcula el flujo másico de DQO de las corrientes.

$$\dot{m}_{i_{DQO}} = [DQO]_i \cdot \dot{Q}_i \tag{Ecuación 55}$$

Tabla 23. Resumen de concentraciones y flujos másicos de DQO

		DQO total	
		kg/m ³	kg/d
FD1		18,91	13.664
FD2		106,72	13.664
E1	FH	26,86	11.791
E2		37,81	12.241
E3		27,81	10.845

Utilizando el dato de la bibliografía 0,35 m³ de CH₄ producido por cada kg de DQO eliminada, se calculan los kilogramos de DQO eliminada debido a la producción de la corriente de biogás.

$$\dot{m}_{DQO\text{eliminada}_{Ei}} = \frac{\dot{Q}_{BIOGÁS\ 2_{Ei}}}{0,35} \tag{Ecuación 56}$$

Conocidos los valores de flujo másico de DQO eliminada se puede calcular el flujo másico de sólidos volátiles en la corriente FD3 conociendo la relación kg DQO/kg SV. Esta relación se calcula en la corriente FH, ya que se conoce el flujo másico de DQO y de sólidos volátiles y, además, se mantendrá constante para FD3.

$$\left(\frac{\dot{m}_{DQO_{FHEi}}}{\dot{m}_{SV_{FHEi}}}\right) = \left(\frac{\dot{m}_{DQO_{FD3Ei}}}{\dot{m}_{SV_{FD3Ei}}}\right) = 1,48 \quad \text{Ecuación 57}$$

$$\dot{m}_{SV_{FD3Ei}} = 1,48 \cdot \dot{m}_{DQO_{FD3Ei}} \quad \text{Ecuación 58}$$

Se conocen todos los datos para proceder al cálculo del flujo másico de sólidos totales, y los porcentajes másicos de los componentes de la corriente FD3.

Por último, se procede al cálculo de la corriente de biosólido generado (BS) siguiendo el mismo procedimiento que en el escenario anterior.

$$\dot{Q}_{BS_{E1}} = 34/d$$

$$\dot{Q}_{BS_{E2}} = 45 \text{ m}^3/d$$

$$\dot{Q}_{BS_{E3}} = 39 \text{ m}^3/d$$

$$\dot{m}_{BS_{E1}} = 34.357 \text{ kg/d}$$

$$\dot{m}_{BS_{E2}} = 45.203 \text{ kg/d}$$

$$\dot{m}_{BS_{E3}} = 38.986 \text{ kg/d}$$

El flujo másico de la corriente de recirculación R3 se calcula con un balance de materia a la segunda etapa de espesamiento (*Ecuación 60*) y R2 a partir de la *Ecuación 43*.

$$\dot{m}_{R3Ei} = \dot{m}_{FD1Ei} - \dot{m}_{FD2Ei} \quad \text{Ecuación 59}$$

En la hidrólisis térmica es necesaria la introducción al proceso de una corriente de vapor. El cálculo del flujo másico de esta corriente (VAPOR) se realizaría aplicando un balance de materia al proceso de hidrólisis según la *Ecuación 61*.

$$\dot{m}_{VAPOR_{Ei}} = \dot{m}_{FHEi} - \dot{m}_{FD2} \quad \text{Ecuación 60}$$

Sin embargo, debido a fallos experimentales ya que la planta de hidrólisis no funcionaba correctamente, las condiciones de operación de la caldera fueron muy extremas, teniendo unos valores de consumo de vapor muy elevados. Por

tanto, la corriente de vapor utilizada en la etapa de hidrólisis térmica no se calculará a partir del balance de materia, sino que se utilizará el dato de la bibliografía Díaz et al. de ~0,42 kg vapor/kg alimentado (kg de FD2). [37]

Para calcular el caudal se utilizará la densidad del vapor de agua en cada una de las condiciones de operación:

Tabla 24. Densidad del vapor de agua en diferentes condiciones[48]

ρ_{vapor} (170°C - 6 bar)	3,2 kg/m ³
ρ_{vapor} (210°C - 9 bar)	4,23 kg/m ³

Se calcula la producción total de biogás mediante la suma de las dos corrientes producidas en los procesos de digestión anaerobia.

$$\dot{Q}_{BIOGÁS\ TOTAL_{Ei}} = \dot{Q}_{BIOGÁS\ 1} + \dot{Q}_{BIOGÁS\ 2_{Ei}} \quad \text{Ecuación 61}$$

$$\dot{m}_{BIOGÁS\ TOTAL_{Ei}} = \dot{m}_{BIOGÁS\ 1} + \dot{m}_{BIOGÁS\ 2_{Ei}} \quad \text{Ecuación 62}$$

Tabla 25. Tabla resumen de las corrientes del escenario HTI

		flujo	caudal	ST	H2O	SV	SF
		kg/d	m ³ /d	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d
	FD 2	128.039	128	16960	111.079	9.346	7.614
E1	FH	439.016	439	14.387	424.630	7.990	6.396
E2		323.748	324	14.549	309.199	6.325	8.224
E3		389.951	390	14.600	375.351	6.979	7.621
E1	FD 3	439.016	439	14.387	424.630	7.990	6.396
E2		323.748	324	14.549	309.199	6.325	8.224
E3		389.951	390	14.600	375.351	6.979	7.621
E1	BS	58.463	58	11.693	46.771	5.296	6.396
E2		71.339	71	14.268	57.071	6.044	8.224
E3		61.703	62	12.341	49.363	4.719	7.621
E1	R2	380.553	381	-	380.553	-	-
E2		252.409	252	-	252.409	-	-
E3		328.248	328	-	328.248	-	-
	R3	594.750	595	-	594.750	-	-
E1	VAPOR	53.776	16.805	-	53.776	-	-
E2		53.776	12.713	-	53.776	-	-
E3		53.776	12.713	-	53.776	-	-

Tabla 26. Tabla resumen de % máxicos de las corrientes del escenario HTI

		%ST	%H2O	SV/ST
	FD 2	13,25	86,75	0,55
E1	FH	3,28	96,72	0,55
E2		4,49	95,51	0,43
E3		3,74	96,26	0,48
E1	FD 3	2,66	97,34	0,45
E2		4,41	95,59	0,42
E3		3,16	96,84	0,38
E1	BS	20	80	0,45
E2		20	80	0,42
E3		20	80	0,38
E1	R2	0	100	-
E2		0	100	-
E3		0	100	-
	R3	0	100	-
E1	VAPOR	0	100	-
E2		0	100	-
E3		0	100	-

Tabla 27. Tabla resumen de la producción de biogás en el escenario HTI

		flujo kg/d	caudal m ³ /d	CH4 m ³ /d	CH4 kg/d
E1	BIOGÁS TOTAL	11.974	9.978	6.532	7.839
E2		11.527	8.672	6.303	7.565
E3		11.864	11.864	6.499	7.799

4.5.2.2. Balance de energía

Para el balance de energía en el escenario HTI hay que tener en cuenta, además de que existe una etapa más de concentración de lodo que en el escenario CDA donde se consumirá energía y una segunda digestión donde aparte de generarse biogás también se consume energía, que la incorporación más importante de este proceso va a ser una etapa de hidrólisis térmica donde se consume una gran cantidad de energía térmica al introducir una corriente de vapor.

También se ha considerar que el lodo a la salida de la etapa de hidrólisis está a temperatura muy elevada y se debe enfriar hasta la temperatura anaerobia

(35°C) pudiéndose aprovechar esa energía térmica para el calentamiento del lodo al que se le realiza la primera digestión.

DESHIDRATACIÓN Y ESPESAMIENTO

Al igual que para el escenario convencional, el equipo empleado en la concentración de los lodos es un decantador centrífugo y también será necesario tener en cuenta el caudal a tratar en las tres etapas de concentración ($\dot{Q}_{FM1}, \dot{Q}_{FD1}, \dot{Q}_{FD3}$).

El caudal de las corrientes FM1 y FD1 será el mismo que para el escenario anterior, divididos en cinco y tres partes respectivamente. Por tanto, al igual que para la depuración de aguas mediante el tratamiento de lodos CDA se utilizarán decantadores centrífugos Flottweg OSE (*Ilustración 22*).

Espesamiento 1:

$$\dot{Q}_{FM1/5} = 20,42 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow \text{DF OSE C3E-4} \rightarrow P_{\text{espesamiento HTI1/5}} = 16 \text{ KW}$$

$$P_{\text{espesamiento1HTI total}} = P_{\text{espesamiento1HTI1/5}} \cdot 5 = 80 \text{ KW} \quad \text{Ecuación 63}$$

Espesamiento 2:

$$\dot{Q}_{FD1/3} = 10,04 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow \text{DF OSE C2E-4} \rightarrow P_{\text{espesamiento2HTI1/3}} = 8,7 \text{ KW}$$

$$P_{\text{espesamiento2HTI total}} = P_{\text{espesamiento2HTI1/3}} \cdot 3 = 26,1 \text{ KW} \quad \text{Ecuación 64}$$

Sin embargo, ahora existe una nueva etapa de deshidratación del fango final, de la corriente FD3 que está referida a cada una de las condiciones de los experimentos. El caudal FD3 será tratado en una única centrífuga.

Deshidratación:

	Q_{FD3} (m ³ /h)	
E1	18,29	$\rightarrow \text{DF OSE C3E-4} \rightarrow P_{E1 \text{ deshidrtaciónHTI}} = 16 \text{ KW}$
E2	13,49	$\rightarrow \text{DF OSE C3E-4} \rightarrow P_{E2 \text{ deshidrtaciónHTI}} = 16 \text{ KW}$
E3	16,25	$\rightarrow \text{DF OSE C3E-4} \rightarrow P_{E3 \text{ deshidrtaciónHTI}} = 16 \text{ KW}$

$$P_{deshidratación_{HTI} total_i} = P_{E_i deshidratación_{HTI}}$$

Ecuación 65

AGITACIÓN

En el escenario de tratamiento de lodos mediante HTI se producen dos etapas de digestión anaerobia. La primera digestión anaerobia se producirá en tres reactores de 6.000 m³ mientras que la segunda digestión, al haber menos caudal de tratamiento únicamente se llevará a cabo en dos digestores del mismo volumen. Se utilizará el mismo tipo de agitador que para el escenario anterior: los agitadores de baja velocidad Flyght 4410 de Xylem.

El rango de potencia en el eje de los agitadores Flyght es de 0,9 a 2,6 KW, por lo que se escogerá para los cálculos un valor de $P_{agitador} = 1,5 \text{ KW}$. [47]

Como los reactores son de un volumen muy alto, se colocarán dos agitadores a lo largo del reactor de forma vertical, por lo que la potencia consumida en cada reactor será $P_{agitación reactor} = 3 \text{ KW}$, y la potencia total:

$$P_{agitación_{HTI} total} = P_{agitación reactor} \cdot 5 = 15 \text{ KW}$$

Ecuación 66

La potencia eléctrica total consumida durante el proceso de depuración de aguas residuales urbanas mediante el método de hidrólisis térmica intermedia, por tanto, será la suma de todas las potencias consumidas por los equipos principales.

$$P_{ELÉCTRICA CONSUMIDA HTI}$$

$$= P_{agitación_{HTI} total} + P_{deshidratación_{HTI} total} \\ + P_{espesamiento1_{HTI} total} + P_{espesamiento2_{HTI} total}$$

Ecuación 67

Tabla 28. Resumen potencia y energía eléctrica total consumida en el escenario HTI

	P _{CONSUMIDA HTI} (KW)	E _{CONSUMIDA HTI} (KWh)	E _{CONSUMIDA HTI} (KWh/año)
E1	1.869	1.869	16.374.782
E2	1.916	1.916	16.780.434
E3	1.916	1.916	16.780.434

HIDRÓLISIS TÉRMICA

Como se ha dicho, en la etapa de hidrólisis es necesaria la introducción de una corriente de vapor de la que anteriormente, en el balance de materia, se ha podido calcular su caudal.

Esta corriente de vapor genera un gran consumo de energía y depende de las condiciones a las que se introdujo el vapor de agua en cada experimento.

$$E_{VAPOR_i} = \dot{m}_{VAPOR_i} \cdot \Delta H_{VAPOR} \quad \text{Ecuación 68}$$

Utilizando el factor de conversión de la Ecuación 49, obtenemos el consumo de energía en KWh.

Tabla 29. Resumen energía y potencia consumida en la etapa de hidrólisis térmica en el escenario HTI

		\dot{m}_{vapor} (kg/h)	ΔH_{vapor} (KJ/kg)	E_{vapor} (KJ/h)	E_{vapor} (KWh)	P_{vapor} (KW)
E1	170°C-6bar	2.241	2.783	6.235.803	1.732	1.732
E2	210°C-9bar	2.241	2.857	6.402.509	1.778	1.778
E3	210°C-9bar	2.241	2.857	6.402.509	1.778	1.778

CALENTAMIENTO

El proceso de calentamiento de la corriente de lodo que entra a la primera digestión, FD2, es el mismo que para el escenario anterior.

$$E_{Calentamiento_{HTI}} = E_{Calentamiento_{CDA}} = 708 \text{ KWh}$$

La energía térmica consumida durante el proceso convencional de digestión anaerobia es la suma de la energía necesaria para el proceso de hidrólisis térmica y la consumida en el calentamiento.

$$E_{TÉRMICA CONSUMIDA HTI_{Ei}} = E_{VAPOR_{Ei}} + E_{Calentamiento_{HTI}} \quad \text{Ecuación 69}$$

ENFRIAMIENTO

Es necesario el enfriamiento de la corriente de lodo hidrolizado desde la temperatura de salida de la corriente FH del proceso de hidrólisis térmica hasta la temperatura de entrada de esta corriente a la digestión anaerobia. La temperatura de salida del proceso de hidrólisis no se conoce con certeza, por lo que se supondrá para los cálculos una temperatura de 80°C, menor que los

100°C (punto de ebullición del agua a temperatura ambiente), ya que estamos ante una corriente líquida.

$$C_{p_{lodo}}(80^{\circ}\text{C}, 1\text{atm}) = C_{p_{agua}}(20^{\circ}\text{C}, 1\text{atm}) = 4,1968 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^{\circ}\text{C}} \quad [48]$$

$$E_{\text{Enfriamiento}_{HTI}} = \dot{m}_{FH_{Ei}} \cdot C_{p_{lodo}}(80^{\circ}\text{C}, 1\text{atm}) \cdot (\Delta T) \quad \text{Ecuación 70}$$

$$E_{\text{Enfriamiento}_{HTI}} = \dot{m}_{FH_{Ei}} \cdot 4,1968 \cdot (80 - 35)$$

Tabla 30. Resumen de energía térmica obtenida por enfriamiento

		E(KJ/h)	E(KWh)	E(KWh/año)
ENERGÍA TÉRMICA OBTENIDA EN ENFRIAMIENTO 80°C a 35°C	E1	3.454.620	960	8.406.242
	E2	2.547.572	708	6.199.092
	E3	3.068.525	852	7.466.745

Esta energía cedida en el enfriamiento de la corriente FH se utilizaría mediante un sistema de intercambio de calor, en el que no se centrará este Trabajo de Fin de Grado, para obtener el calor necesario en el calentamiento de la corriente FD2. Sin embargo, ya que no se profundizará en el diseño de este cambiador de calor, aunque estos sistemas tengan una eficiencia, se considerará un proceso ideal donde todo el calor cedido será absorbido en el calentamiento.

Por tanto, se considera la energía térmica obtenida para abastecimiento como la suma de la energía térmica producida por el biogás, *Tabla 32. Resumen de la generación de energía de las corrientes de biogás en el escenario HTI*, y la energía obtenida al enfriar la corriente FH.

$$E_{\text{TÉRMICA GENERADA}_{HTI_{Ei}}} = E_{\text{Térmica}_{\text{BIOGÁS}_{\text{TOTAL}_{Ei}}}} + E_{\text{Enfriamiento}_{HTI_{Ei}}} \quad \text{Ecuación 71}$$

DIGESTIÓN ANAEROBIA

Los parámetros principales de cogeneración que se utilizarán para los cálculos de la producción energética del escenario HTI se encuentran resumidos en la *Tabla 6. Principales parámetros de cogeneración* ya que son los mismos que han sido utilizados en el escenario convencional.

La energía generada en la primera digestión (BIOGÁS 1) es la misma que para el escenario anterior. Se calcula la producción de energía en la segunda

digestión (BIOGÁS 2) para así calcular el total de energía generada en los dos procesos anaerobios.

$$E_{generada_{BIOGÁS2Ei}} = PCI_{BIOGÁS} \cdot \dot{Q}_{BIOGÁS2Ei} \quad \text{Ecuación 72}$$

Tabla 31. Resumen de la generación de energía de las corrientes de biogás en el escenario HTI

	BIOGÁS 1	BIOGÁS 2	Total
Q BIOGÁS (m³/h)	330	86	416
		71	400
		82	412
Energía generada biogás (KWh)	2228	583	2.811
		478	2.706
		557	2.785

Tabla 32. Desglose de la energía generada para cogeneración en el escenario HTI

	BIOGÁS 1	BIOGÁS 2	Total
KWh			
EF eléctrica	847	222	1.068
		182	1.028
		212	1.058
EF térmica	1069	280	1.349
		229	1.299
		267	1.337
Refrigeración motor	150	111	260
		91	241
		106	256
Gas escape	310	169	479
		139	449
		162	472
Pérdidas	312	82	928
		67	913
		78	924

Tabla 33. Resumen balance de energía para el escenario HTI

		KWh	KWh/año
TOTAL ENERGÍA ELÉCTRICA CONSUMIDA	E1	137	1.200.996
	E2	137	1.200.996
	E3	137	1.200.996
		KWh	KWh/año

TOTAL ENERGÍA ELÉCTRICA ABASTECIMIENTO	E1	1.068	9.355.801
	E2	1.028	9.006.391
	E3	1.058	9.269.521
		KWh	KWh/año
TOTAL ENERGÍA TÉRMICA CONSUMIDA	E1	2.443	21.398.373
	E2	2.489	21.804.025
	E3	2.489	21.804.025
		KWh	KWh/año
TOTAL ENERGÍA TÉRMICA ABASTECIMIENTO	E1	2.309	20.224.095
	E2	2.006	17.575.586
	E3	2.189	19.175.614

El consumo eléctrico de la planta se puede suplir perfectamente, aun sobrando para su inyección a la red, mientras que la energía térmica producida no llega a abastecer el consumo de energía térmica de la planta.

4.5.3. Balances de materia y energía al proceso sin hidrólisis térmica.

Existen sistemas de doble etapa de digestión, donde en cada uno de los biorreactores ocurre una etapa del proceso de digestión anaerobia, por ejemplo, el primer reactor es de acidificación y el segundo de metanización, o el primero es mesófilo y el segundo termófilo.

Sin embargo, este tercer escenario de tratamiento de lodos que se va a desarrollar no es aplicable en la práctica, ya que dos etapas de digestión similares, mesófilas y con el mismo tiempo de retención, aproximadamente 30 días, hacen que el segundo digestor sólo tenga la figura de digestor secundario, si bien en algunas EDAR, como las de Valladolid, le hay.

4.5.3.1. Balance de materia

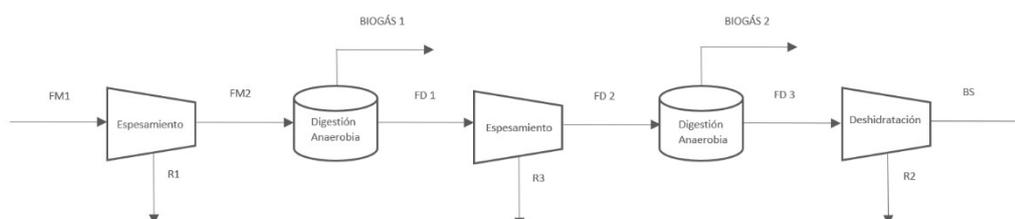


Ilustración 24. Proceso de tratamiento de lodos EDAR sin hidrólisis térmica

Al igual que para el proceso ITH, este escenario es llevado a cabo en el laboratorio a partir del escenario base de tratamiento convencional de los lodos en la EDAR. El inóculo anaerobio que llega al laboratorio (FD1) y es concentrado (FD2), se somete a un segundo proceso de digestión anaerobia bajo las mismas condiciones que se produjeron en la primera digestión realizada en la EDAR. Las demás corrientes, FM1, FM2, FD3, BIOGÁS1, BIOGÁS2, BS, R1, R2 y R3, tienen el mismo significado que para el escenario anterior.

Como se ha explicado anteriormente, este escenario no es aplicable en la práctica, sin embargo, se estudiará ya que sirve para poder comparar directamente con el escenario más conveniente según los resultados.

Las flujos máscicos, caudales y composiciones de las corrientes FM1, FM2, BIOGÁS1, FD1, FD2, R1, R3 son los mismos que en los escenarios anteriores.

El flujo máscico y el caudal de biogás producido en la segunda etapa (BIOGÁS2) se calculará siguiendo el mismo método que en el escenario HTI, ya que se conoce el flujo alimentado (FD2) y el caudal de biogás producido por cada kg de sólido volátil presente en la alimentación (*Tabla 20. Producción acumulada de biogás y CH₄*).

El cálculo de la corriente FD3 se realizará también de la misma forma que para el cálculo de esta corriente en el escenario con hidrólisis térmica, donde también será necesario el uso de los datos de DQO obtenidos experimentalmente (*Tabla 22. Datos DQO*).

Las corrientes restantes, BS y R3 también se calculan mediante las mismas ecuaciones y procesos que para el escenario HTI, por tanto, a continuación, se resumen todos los resultados obtenidos para poder comparar con los diferentes escenarios:

Tabla 34. Tabla resumen de las corrientes del escenario sin HT

	flujo	caudal	ST	H2O	SV	SF
	kg/d	m ³ /d	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d
FD 2	128.039	128	16.960	111.079	9.346	7.614
FD 3	127.084	127	16.005	111.079	8.391	7.614
BS	80.027	80	16.005	64.021	8.391	7.614
R2	47.057	47	-	47.057	-	-
R3	594.750	595	-	594.750	-	-

Tabla 35. Tabla resumen de % máscicos de las corrientes del escenario sin HT

%ST	%H2O	SV/ST
-----	------	-------

FD 2	13,25	86,75	0,55
FD 3	12,59	87,41	0,52
BS	20	80	0,52
R2	0	100	-
R3	0	100	-

Tabla 36. Producción de biogás en el escenario sin HT

	flujo	caudal	CH4	CH4
	kg/d	m ³ /d	m ³ /d	kg/d
BIOGÁS TOTAL	10.545	8.787	5.753	6.904

4.5.3.2. Balance de energía

Para el balance de energía del proceso sin hidrólisis térmica hay que tener en cuenta, que se han sumado una etapa de espesamiento y una de digestión anaerobia al proceso convencional del escenario base.

DESHIDRATACIÓN Y ESPESAMIENTO

El equipo empleado en la concentración de los lodos, al igual que para el resto de los escenarios, es un decantador centrífugo, por tanto, para la elección de la centrífuga es necesario conocer el caudal a tratar en las tres etapas de concentración (\dot{Q}_{FM1} , \dot{Q}_{FD1} , \dot{Q}_{FD3}).

El caudal de las corrientes FM1 y FD1 será el mismo que para los escenarios anteriores, divididos en cinco y tres partes respectivamente. Por tanto, también se utilizarán decantadores centrífugos Flottweg OSE (*Ilustración 22*) siendo el consumo de potencia y energía eléctrica igual al de los otros procesos.

Espesamiento 1:

$$P_{\text{espesamiento1}_{\text{sin HT total}}} = 80 \text{ KW}$$

Espesamiento 2:

$$P_{\text{espesamiento2}_{\text{sin HT total}}} = 26,1 \text{ KW}$$

Sin embargo, ahora existe una nueva etapa de deshidratación del fango anaerobio final, de la corriente FD3. El caudal FD3 será tratado en una única centrífuga Flottweg.

Deshidratación:

$$P_{deshidratación_{sin HT total_i}} = 8,7 \text{ KW}$$

AGITACIÓN

La agitación en las etapas de digestión anaerobia no cambiará respecto a los procesos anteriores, por lo que los agitadores de baja velocidad Flyght 4410 de Xylem seguirán siendo una buena opción para mantener la mezcla a lo largo del biorreactor.

$$P_{agitador} = 1,5 \text{ KW. [47]}$$

Se colocarán dos agitadores a lo largo de cada reactor, por lo que la potencia consumida en cada reactor será $P_{agitación reactor} = 3 \text{ KW}$, y la potencia total, contando con tres reactores en la primera etapa y únicamente dos en la segunda:

$$P_{agitación_{sin HT total}} = 15 \text{ KW}$$

La potencia eléctrica total consumida durante el proceso de depuración de aguas residuales urbanas mediante el método sin hidrólisis térmica será la suma de todas las potencias consumidas por los equipos principales.

$$P_{CONSUMIDA sin HT}$$

Ecuación 73

$$= P_{agitación_{sin HT total}} + P_{deshidratación_{sin HT total}} \\ + P_{espesamiento1_{sin HT total}} + P_{espesamiento2_{sin HT total}}$$

$$P_{CONSUMIDA sin HT} = 129,8 \text{ KW}$$

En una hora se consumen 129,8 KWh de energía, por lo que en un año el consumo energético de los equipos principales del tratamiento de lodos de la EDAR será de 1.137.048 KWh.

$$E_{ELÉCTRICA CONSUMIDA sin HT} = 1.137.048 \text{ KWh/año}$$

CALENTAMIENTO

En este escenario se producen dos calentamientos: el primero (calentamiento 1) es el mismo que para los dos escenarios anteriores, el calentamiento de la corriente FM2 con el mismo consumo energético calculado anteriormente; el segundo calentamiento (calentamiento 2) se produce al llevar la corriente FD”

que sale del segundo espesamiento a 15°C hasta los 35°C necesarios para entrar al reactor biológico.

$$E_{\text{Calentamiento } 1_{\text{sin HT}}} = E_{\text{Calentamiento}_{\text{CDA}}} = E_{\text{Calentamiento}_{\text{CDA}}} = 708 \text{ KWh}$$

La energía del calentamiento 2 se calcula haciendo uso de la Ecuación 48.

$$E_{\text{Calentamiento } 2_{\text{sin HT}}} = 124 \text{ KWh}$$

El consumo de energía térmica total será la suma de ambos calentamientos:

$$\begin{aligned} E_{\text{TÉRMICA CONSUMIDA}_{\text{sin HT}}} &= E_{\text{Calentamiento } 1_{\text{sin HT}}} + E_{\text{Calentamiento } 2_{\text{sin HT}}} \\ &= 832 \text{ KWh} \end{aligned}$$

DIGESTIÓN ANAEROBIA

Los parámetros principales de cogeneración que se utilizarán para los cálculos de la producción energética del escenario HTI se encuentran resumidos en la *Tabla 6. Principales parámetros de cogeneración* ya que son los mismos que han sido utilizados en los demás escenarios.

Se calcula la producción de energía en la segunda digestión (BIOGÁS 2) haciendo uso de la *Ecuación 69*, ya que la energía generada en la primera digestión (BIOGÁS 1) es la misma que para los otros dos procesos, para así calcular el total de energía generada en los dos procesos anaerobios.

Tabla 37. Resumen generación de energía de las corrientes de biogás en el escenario sin HT

	BIOGÁS 1	BIOGÁS 2	Total
Q BIOGÁS (m3/h)	330	37	366
Energía generada biogás (KWh)	2.228	247	2.475

Tabla 38. Desglose de la energía generada para cogeneración en el escenario sin HT

	BIOGÁS 1	BIOGÁS 2	TOTAL
	KWh	KWh	KWh
EF eléctrica	847	94	941
EF térmica	1.069	119	1.188
Refrigeración motor	423	47	470
Gases de escape	646	72	718
Pérdidas	312	35	347

La energía térmica producida en este proceso de tratamiento de los lodos sin hidrólisis será únicamente la energía térmica total generada por el biogás.

$$E_{TÉRMICA\ GENERADA_{sin\ HT}} = E_{Térmica_{BIOGÁS\ TOT}} = 1188,05\ KWh$$

Tabla 39. Resumen balance de energía para el escenario sin HT

	KWh	KWh/año
TOTAL ENERGÍA ELÉCTRICA CONSUMIDA	130	1.137.048
	KWh	KWh/año
TOTAL ENERGÍA ELÉCTRICA ABASTECIMIENTO	941	8.239.117
	KWh	KWh/año
TOTAL ENERGÍA TÉRMICA CONSUMIDA	832	7.292.085
	KWh	KWh/año
TOTAL ENERGÍA TÉRMICA ABASTECIMIENTO	1.188	10.407.306

Se logra el abastecimiento energético total de la planta además de poder inyectar energía eléctrica a la red.

5. Viabilidad del proceso

5.1 Viabilidad técnica

El principal aspecto a tener en cuenta para que el proyecto sea viable técnicamente es que sea posible llevar a cabo la implantación de un proceso de tratamiento de aguas residuales de este tipo con la tecnología disponible.

Actualmente el tratamiento de aguas mediante hidrólisis térmica como pretratamiento térmico está en vías de investigación, a escala de laboratorio, teniendo poca bibliografía al alcance. Sin embargo, existen diferentes tecnologías comerciales de hidrólisis térmica como tratamiento de lodos (Cambi®, Biothelys®, Exelys®, TPH®, Lysotherm®, Turbotec®, tH4+®, HCHS® y Aqualysis®) llevadas a cabo por diferentes compañías.

Dado que el proceso de tratamiento de aguas residuales mediante hidrólisis térmica intermedia únicamente cuenta a mayores con una segunda etapa de digestión de los lodos después del tratamiento de hidrólisis, se concluye que, en materia de equipos de tratamiento, el proceso de hidrólisis térmica intermedia aplicado a la EDAR de Valladolid es viable técnicamente, ya que se cuenta con ejemplos en los que ya se han utilizado satisfactoriamente estos sistemas.

No obstante, el rendimiento del proceso de depuración de las aguas residuales urbanas introduciendo el tratamiento térmico se ve limitado por esta etapa de hidrólisis ya que se necesita un alto aporte de energía. Por tanto, aunque se introduce la segunda etapa de digestión para intentar suplir el consumo de energía de la planta, la viabilidad técnica del proyecto a estudio en este Trabajo de Fin de Grado depende considerablemente de los balances de energía.

Ahora bien, lo que se busca es la optimización tanto de la productividad de biogás como de la eliminación de sólidos volátiles del proceso de hidrólisis térmica frente al proceso convencional de tratamiento de aguas impuesto en la mayoría de las estaciones depuradoras, por lo que habrá que tener en cuenta, a mayores de este balance energético, estos otros parámetros para considerar viable técnicamente, en materia de energía, el proyecto.

<i>Proceso convencional de digestión anaerobia (CDA)</i>	<i>Proceso de hidrólisis térmica intermedia (HTI)</i>	<i>Proceso sin hidrólisis térmica intermedia (sin HT)</i>
---	--	--

ENERGÍA ELÉCTRICA CONSUMIDA (KWh)			
115,10	E1	137	129,8
	E2	137	
	E3	137	
ENERGÍA ELÉCTRICA PRODUCIDA PARA ABASTECIMIENTO (KWh)			
813,96	E1	1068	940
	E2	1028	
	E3	1058	
ENERGÍA ELÉCTRICA PARA INYECCIÓN EN LA RED (KWh)			
698,86	E1	930	810
	E2	891	
	E3	921	
ENERGÍA TÉRMICA CONSUMIDA (KWh)			
708,42	E1	86	832
	E2	2489	
	E3	2489	
ENERGÍA TÉRMICA PRODUCIDA PARA ABASTECIMIENTO (KWh)			
1028,16	E1	2308	1188
	E2	2006	
	E3	2189	
ELIMINACIÓN DE SÓLIDOS VOLÁTILES (%)			
45	E1	72,42	56,30
	E2	68,52	
	E3	75,42	
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS (kg/d)			
7.908,923	E1	9978	8.640
	E2	9605	
	E3	9886	
GENERACIÓN DE BIOSÓLIDO (t/d)			
84,80	E1	58	80
	E2	71	
	E3	61	

Tabla 40. Tabla comparativa de los parámetros principales en los diferentes escenarios

En los datos se observa que el proceso a estudio, el escenario de hidrólisis térmica intermedia, no logra suplir las necesidades energéticas adicionales (consumo de vapor) de la planta.

Sin embargo, ya que estos datos son experimentales, hay que tener en cuenta que la energía térmica utilizada en la inyección de vapor sería menor si el fango entrara al proceso de hidrólisis más concentrado. Como se ha dicho anteriormente, las condiciones de concentración (%SV) obtenidas mediante el diseño de experimentos eran de 10,8% mientras que en el espesamiento

realizado en el laboratorio únicamente se llegó a un 7,3% de sólidos volátiles. Además, no se logró el tiempo de las condiciones de optimización que era de 45 minutos, estando dentro del reactor de hidrólisis solo 8 minutos. Esta diferencia de concentración y de tiempo explicaría ese aumento en el consumo de energía térmica que no se logra compensar.

Tabla 41. Diferencias entre las condiciones teóricas y las experimentales

DATOS EXPERIMENTALES					
	T	tiempo	%SVecua	m ³ CH ₄ /kg SV _{alimentado}	Eliminación SV (%)
E1	170	25	7,3	0,174	14,50
E2	210	5	7,3	0,184	32,32
E3	210	8	7,3	195	25,33

MODELO STATGRAPHICS					
	T	tiempo	%SV	m ³ CH ₄ /kg SV _{alimentado}	Eliminación SV (%)
E1	170	25	10,8	0,226	14,82
E2	210	5	10,8	0,232	23,17
E3	210	45	10,8	0,257	28,27

Con el fin de conseguir esta compensación energética, se realizó un balance de materia y energía utilizando los datos teóricos obtenidos con Statgraphics. A continuación, se muestran los resultados.

Tabla 42. Principales corrientes del escenario HTI calculadas utilizando las condiciones teóricas obtenidas mediante Statgraphics

HTI TEÓRICO							
		flujo	caudal	ST	H2O	SV	SF
		kg/d	m ³ /d	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d
	FD 2	86.533	87	16.960	69.573	9.346	7.614
E1	FH	437.407	437	14.334	423.074	7.961	6.373
E2		322.561	323	14.496	308.065	7.180	7.316
E3		388.522	389	14.546	373.976	6.703	7.843
E1	FD 3	437.407	437	10.856	423.074	4.483	6.373
E2		322.561	323	12.350	308.065	5.034	7.316
E3		388.522	389	11.820	373.976	3.977	7.843
E1	BS	54.282	54	10.856	43.426	4.483	6.373
E2		61.748	62	12.350	49.399	5.034	7.316
E3		59.102	59	11.820	47.281	3.977	7.843
E1	VAPOR	36.344	11.357	-	36.344	-	-
E2		36.344	170	-	36.344	-	-
E3		36.344	8.592	-	36.344	-	-

Tabla 43. Comparación entre la producción de biogás calculada utilizando las condiciones teóricas frente a las experimentales

		HTI EXPERIMENTAL		HTI TEÓRICO	
		flujo	caudal	flujo	caudal
		kg/d	m ³ /d	kg/d	m ³ /d
BIOGÁS TOTAL	E1	11.974	9.978	12.696	10.580
	E2	11.527	8.672	12.412	10.343
	E3	11.864	11.864	12.509	10.424

Comparando estos resultados obtenidos a partir de datos teóricos con los obtenidos experimentalmente de la *Tabla 25: Tabla resumen de las corrientes del escenario HTI*, se observa, ya que se aumentó la concentración de sólidos volátiles en la corriente FD2, como ésta se ve reducida en cuanto al flujo másico total, debido a que la concentración de sólidos de FD2 se encuentra en el denominador de la ecuación de cálculo de \dot{Q}_{FD2} (Ecuación 51).

Al disminuirse el flujo másico que entra al proceso de hidrólisis, como también puede apreciarse en la comparación de ambas tablas anteriormente citadas, será necesaria una menor cantidad de vapor. Se observa también una notoria reducción en la generación de biosólido y en la generación promedia de biogás.

Yendo al tema importante en materia de viabilidad energética por el que se han presentado los resultados anteriores, a continuación, se presentan los resultados del balance de energía utilizando los datos teóricos.

Tabla 44. resumen del balance de energía para el escenario HTI utilizando las condiciones teóricas obtenidas mediante Statgraphics

TOTAL ENERGÍA ELÉCTRICA CONSUMIDA	E1	KWh	137	KWh/año	1.200.996
	E2	KWh	137	KWh/año	1.200.996
	E3	KWh	137	KWh/año	1.200.996
TOTAL ENERGÍA ELÉCTRICA ABASTECIMIENTO	E1	KWh	1.132	KWh/año	9.920.165
	E2	KWh	1.107	KWh/año	9.698.098
	E3	KWh	1.115	KWh/año	9.773.833
TOTAL ENERGÍA TÉRMICA CONSUMIDA	E1	KWh	1.881	KWh/año	16.479.537
	E2	KWh	1.912	KWh/año	16.753.690
	E3	KWh	1.912	KWh/año	16.753.690

		KWh	KWh/año
TOTAL ENERGÍA TÉRMICA ABASTECIMIENTO	E1	2.387	20.906.168
	E2	2.103	18.426.601
	E3	2.259	19.785.273

Esta tabla anterior se debe comparar con la *Tabla 33. Resumen de balance de energía para el escenario HTI* para observar que, al aumentar la concentración de sólidos volátiles, se logró aumentar también la generación de biogás, mientras que al disminuirse el flujo másico que entra al proceso de hidrólisis se disminuyó la cantidad de vapor necesaria. Ambos aspectos es lo que llevan tanto a un aumento en la producción de energía como a una disminución de consumo de energía térmica que hace que ahora sí se pueda compensar ese gasto energético adicional procedente de la implementación del proceso de hidrólisis térmica entre dos digestiones anaerobias y el proyecto sea totalmente viable técnicamente.

Con estos nuevos balances teóricos se consigue también mejorar la eliminación total de sólidos volátiles desde un promedio para los tres experimentos del 72% hasta un 76%.

5.2 Viabilidad económica

En la viabilidad del proyecto se encuentran también aspectos económicos. Un modelo atractivo tanto social como medioambiental y económicamente es el concepto de economía circular, por lo que se tratará de acercar el proyecto lo máximo posible a este modelo.

La economía circular propone utilizar y optimizar materiales, productos o recursos existentes con el fin de crear un valor añadido, aumentando su eficiencia y su ciclo de vida, y eliminando así los posibles residuos.

En los balances de materia y de energía del proceso de hidrólisis térmica intermedia se observa que no se llega a cubrir totalmente las necesidades energéticas adicionales de la planta, por lo que sería necesario un gasto económico para la compra de energía térmica. También hay que tener en cuenta que el mayor gasto se produce en las etapas de deshidratación, no en el aspecto de consumo de energía, sino en materia de polielectrolitos requeridos para este proceso.

Sin embargo, la energía eléctrica para inyección a la red de la que obtener beneficio económico es muy elevada, además de contar con la posible venta de los lodos producidos para uso agrícola y del agua para riego, lo que podría

amortiguar los costes de planta haciendo el proyecto viable económicamente hablando.

Como se ha explicado en el apartado anterior 5.3. Viabilidad técnica, al utilizar los datos teóricos obtenidos mediante el diseño de experimentos de Statgraphics se logra esa compensación energética obteniendo un balance positivo energéticamente, lo que se traduce en un balance positivo también económicamente, ya que se elimina el término de la compra de energía térmica al lograrse suplir totalmente el consumo energético.

Sin embargo, en la *Tabla 40. Tabla comparativa de los parámetros principales en los diferentes escenarios* se observa cómo, aunque el balance energético no llegase a ser positivo, en el caso de los dato experimentales, se produce ese concepto buscado de economía circular:

- En el escenario HTI se consigue dar un valor añadido al fango digerido en la primera digestión obteniendo de él una corriente de biogás aprovechada para la producción de energía
- El aprovechamiento de la energía térmica producida en el enfriamiento del lodo hidrolizado para el calentamiento del fango que entra a los procesos de digestión y la energía térmica generada a partir del biogás que intenta suplir esa necesidad adicional de energía para la inyección de vapor en el proceso de hidrólisis, hace que no haya desperdicio de energía producida.
- Además de maximizar tanto la producción de biogás como la eliminación total de sólidos volátiles respecto al proceso convencional, lo que se traduce en una mayor producción de energía, se logra reducir el residuo generado, es decir, se consigue reducir el volumen de biosólido producido consiguiendo un menor impacto tanto ambiental como económico para la planta.

5.3 Viabilidad medioambiental y legal

Para que el proyecto sea viable medioambiental y legalmente es necesario el cumplimiento de la normativa legal en materia de gestión de lodos y producción de energía. Por tanto, a continuación, se resumirá el marco legal dentro del cual se encuentra el caso a estudio en este Trabajo de Fin de Grado.

El punto de partida para para la viabilidad legal y medioambiental es el cumplimiento de los valores límite de vertido de aguas residuales urbanas tratadas que será regulado por cada municipio. Los valores límite autorizados para el vertido de aguas de la estación depuradora de Valladolid se encuentran

en *Ilustración 3. Características químicas del agua de la EDAR de Valladolid (2018)*.

Sin embargo, ya que el objetivo principal es el tratamiento de los lodos de depuración, se tendrá que estudiar la normativa legal de gestión de estos residuos. Las EDAR, como productoras de los lodos, deben asegurar su adecuado tratamiento, ya sea en sus instalaciones o mediante gestores autorizados, conforme a lo establecido en la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, que regula la gestión de estos residuos considerados no peligrosos.[49] [50]

Teniendo en cuenta las características de los lodos generados en las depuradoras, el destino de estos se ajustará al principio de jerarquía de residuos incorporado en la ley anteriormente citada, donde “la producción y gestión de residuos que ha de centrarse en la prevención, la preparación para la reutilización, el reciclaje u otras formas de valorización, incluida la valorización energética y aspira a transformar la Unión Europea en una «sociedad del reciclado» y contribuir a la lucha contra el cambio climático” [51], quedando en último lugar su incineración y su deposición en vertedero.

La aplicación al terreno de los fangos de depuradora se encuentra regulada por el Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. Con este Real Decreto, las comunidades autónomas establecen una serie de controles por para el seguimiento y utilización de los lodos en la actividad agraria y se crea el Registro Nacional de Lodos (RNL).[52] Las exigencias del suministro de información contenida en el registro, que debe ser proporcionada por las estaciones depuradoras, está regulada por la Orden AAA71072/2013, de 7 de junio, sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario.

Un 8% de los lodos de depuración generados es destinado a incineración y coincineración de acuerdo con el Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación. [53]

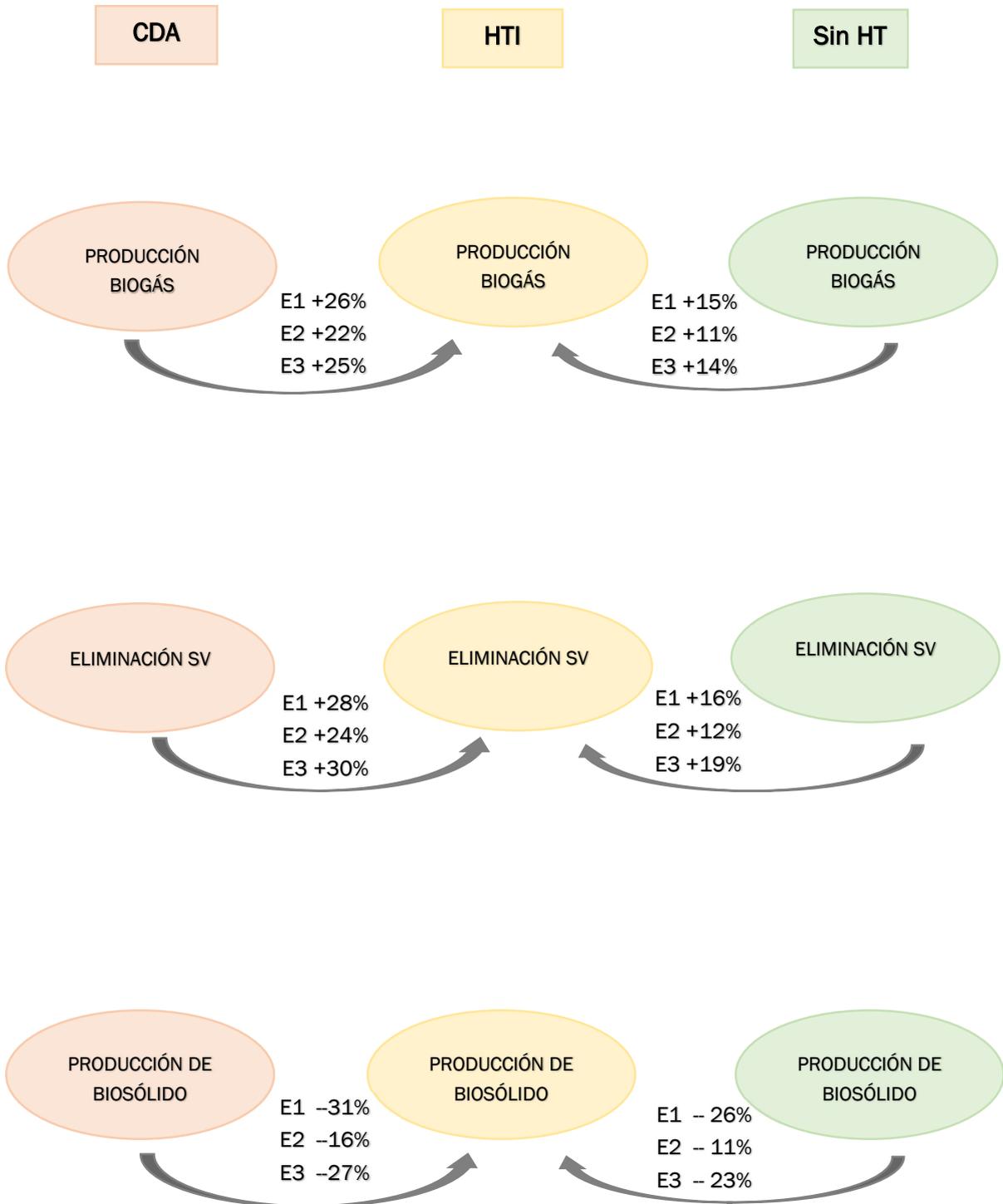
La última opción en la gestión de lodos es el depósito en vertedero (4% de los lodos generados) cumpliendo con el Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. [54]

El principal objetivo para la viabilidad de este proyecto estudiado en este Trabajo de Fin de grado es la optimización de la obtención de energía a partir de los lodos de depuradora regulada por el Real Decreto 413/2014, de 6 de

junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.

Fuera de materia legal, el proyecto es viable medioambientalmente ya que, un aspecto importante conseguido es la reducción del volumen de biosólido producido, así como su carga contaminante. Además, se cierra el círculo en cuanto a producción y consumo de energía aprovechando todos los recursos posibles y eliminando la mayor cantidad de residuos.

6. Conclusiones



En el gráfico anterior se resume numéricamente, de forma porcentual, el aumento de cada uno de los parámetros importantes para el proceso de tratamiento de lodos procedentes de la depuración de aguas residuales para cada uno de los tres escenarios a comparar: convencional de digestión anaerobia (CDA), implementación de una etapa de hidrólisis térmica intermedia (HTI) y el tratamiento sin hidrólisis térmica.

Como se ha dicho anteriormente, este último escenario sin hidrólisis térmica no es aplicable en la práctica, aunque se utilizará para compararlo directamente con los demás escenarios.

El objetivo de esta investigación experimental es el estudio de la viabilidad y la optimización de las condiciones del proceso de hidrólisis térmica implementado entre dos etapas de digestión anaerobia.

Primero se han desarrollado y calculado los principales parámetros de tres escenarios de tratamiento de lodos de depuradora, para poder observar, que efectivamente el proceso de hidrólisis térmica intermedia es el más favorable además de ser viable tanto técnica, como económica, como medioambiental y legalmente. Pese a fallos experimentales que se traducen en balances energéticos negativos, en el apartado de 5.3. Viabilidad técnica se ha demostrado cómo con el diseño de experimentos realizado del que se obtienen los datos teóricos de los parámetros que deberían haberse llevado a cabo en el laboratorio en una situación ideal, el balance energético resulta positivo. Esto también puede verse en los *Gráficos 4,5,6 y 7*.

El gráfico anterior demuestra cómo se logra aumentar tanto la producción de biogás como la eliminación total de sólidos volátiles respecto a los otros dos escenarios. También es importante la reducción del biosólido generado al utilizar el proceso de hidrólisis intermedia frente a escenario convencional o el escenario sin hidrólisis.

Así, se concluye que el proceso de tratamiento de lodos de depuradora mediante la implementación de una hidrólisis térmica intermedia entre dos etapas de digestión anaerobia es viable y además es la mejor opción.

Para ver de diferente forma cómo aumentan o disminuyen los parámetros principales se presentan los siguientes gráficos.

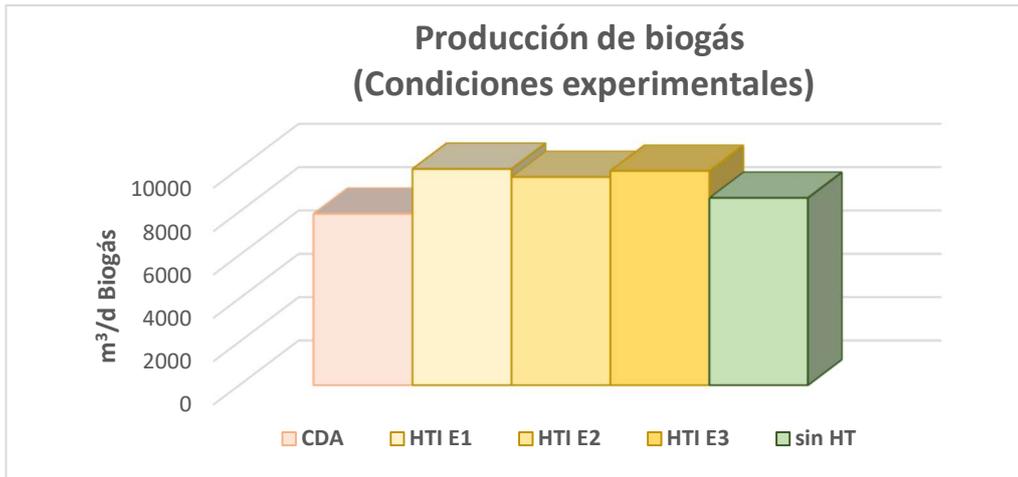


Gráfico 1. Producción de biogás para los diferentes escenarios

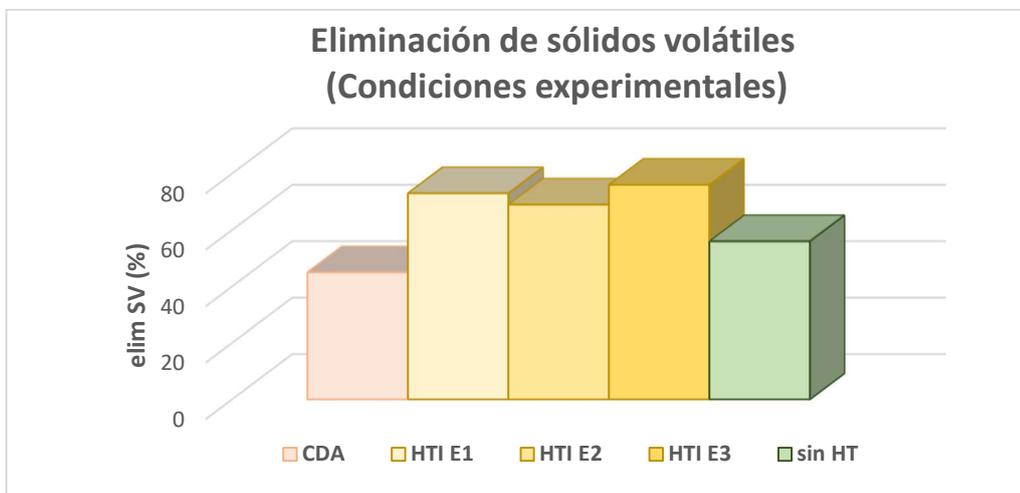


Gráfico 2. Eliminación de sólidos volátiles para los diferentes escenarios

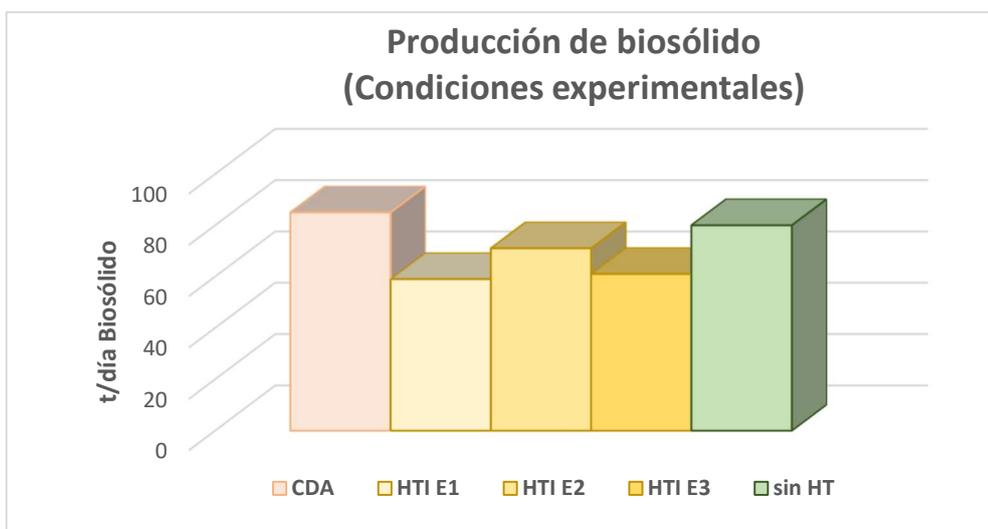


Gráfico 3. Producción de biosólido para los diferentes escenarios

El experimento 1 (E1) se llevó a cabo bajo las condiciones óptimas del proceso tradicional de hidrólisis térmica: 170°C durante 25 minutos con la máxima concentración posible, que en este caso fue un 7,3% de sólidos volátiles.

El resultado de las condiciones de operación optimizadas por el software Statgraphics fueron las dadas para el experimento 3 (E3) bajo una temperatura de 210°C, un tiempo de 45 minutos y una concentración de sólidos volátiles a la entrada del proceso de hidrólisis térmica del 10,8%. Estas condiciones no pudieron llevarse a cabo en el laboratorio, teniendo realmente unas condiciones de 8 minutos y una concentración de sólidos volátiles del 7,3%.

Para el experimento número 2 (E2) se escogió la situación de temperatura óptima dada por el diseño de experimentos realizado (210°C) y el tiempo mínimo de hidrólisis requerido por el diseño (5 min) con un lodo concentrado al máximo posible (7,3%).

Los parámetros principales que es necesario maximizar son la producción de biogás y la eliminación de sólidos volátiles. En los Gráficos 1 y 2 se puede ver que cada uno de los parámetros se encuentra maximizado en diferentes condiciones:

La producción de biogás es maximizada para las condiciones del experimento E1, además en la *Tabla 43. Comparación entre la producción de biogás calculada utilizando las condiciones teóricas frente a las experimentales* se ve cómo la aplicación de las condiciones óptimas teóricas también maximiza este parámetro para las condiciones E1.

En cuanto al parámetro eliminación de sólidos volátiles, utilizando los balances con los datos experimentales o utilizándolos con los datos teóricos tampoco cambia las condiciones para las que se maximiza esta eliminación, en este caso las condiciones óptimas dadas por el asistente de diseño de experimentos de Statgraphics (E3). Para este experimento no se consigue el máximo de producción de biogás probablemente por la generación de compuestos recalcitrantes de difícil degradación anaerobia, al producirse la hidrólisis a una temperatura muy elevada [35]

Un parámetro que no ha sido necesario optimizar, pero que no por ello deja de ser importante es la producción de biosólido que, aunque pueda ser usado como fertilizante, no deja de ser un residuo contaminante para el medioambiente y se debe tender a su minimización. Las condiciones que minimizan esta producción, como se puede observar en el Gráfico 3 son las elegidas arbitrariamente para el experimento 2.

Ninguna de las tres condiciones optimiza todos los parámetros seleccionados, por lo que para elegir las condiciones que mejor se adapten a nuestro proceso de hidrólisis intermedia será necesario ver el comportamiento de los balances de energía.

En los gráficos presentados a continuación, a mayores de cada experimento HTI, también puede verse el escenario de hidrólisis térmica comparado con los otros dos escenarios (CDA y sin HT).

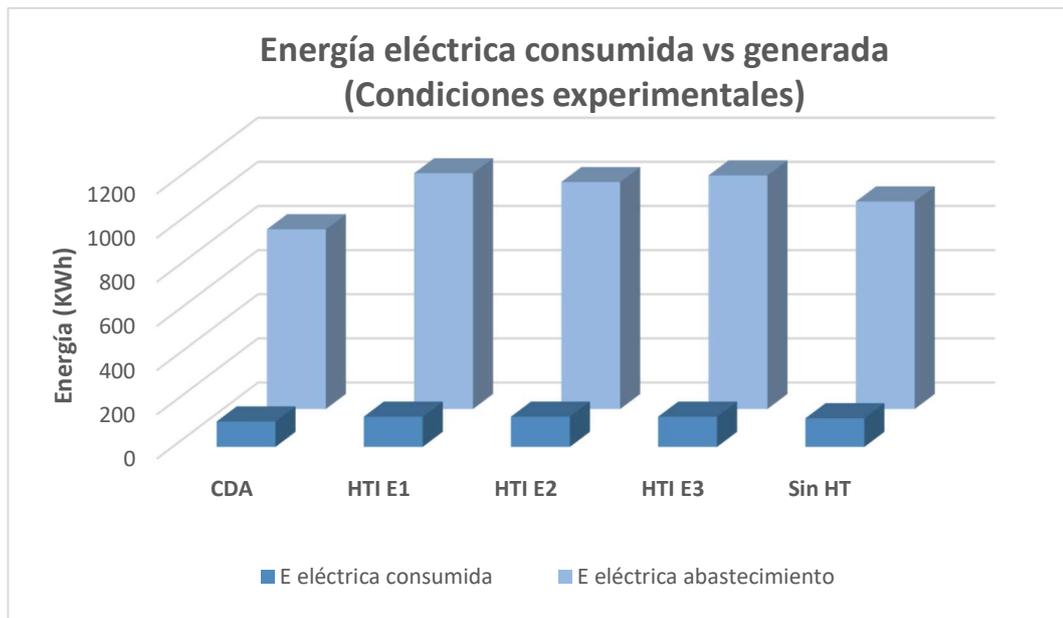


Gráfico 4. Resumen del balance de energía eléctrica para los diferentes escenarios en condiciones experimentales

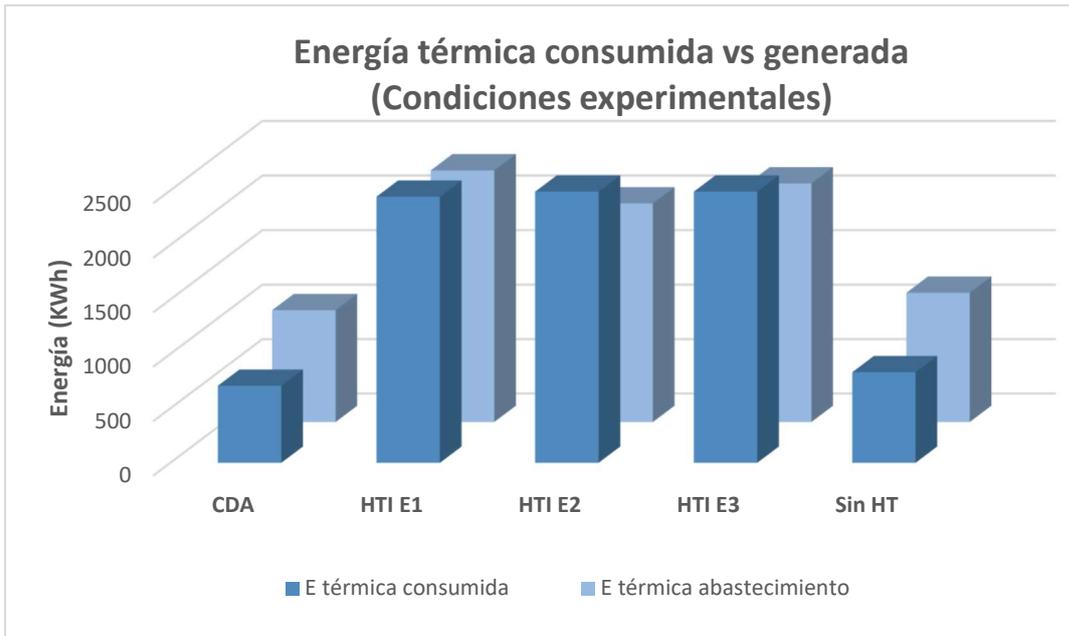


Gráfico 5. Resumen del balance de energía térmica para los diferentes escenarios en condiciones experimentales

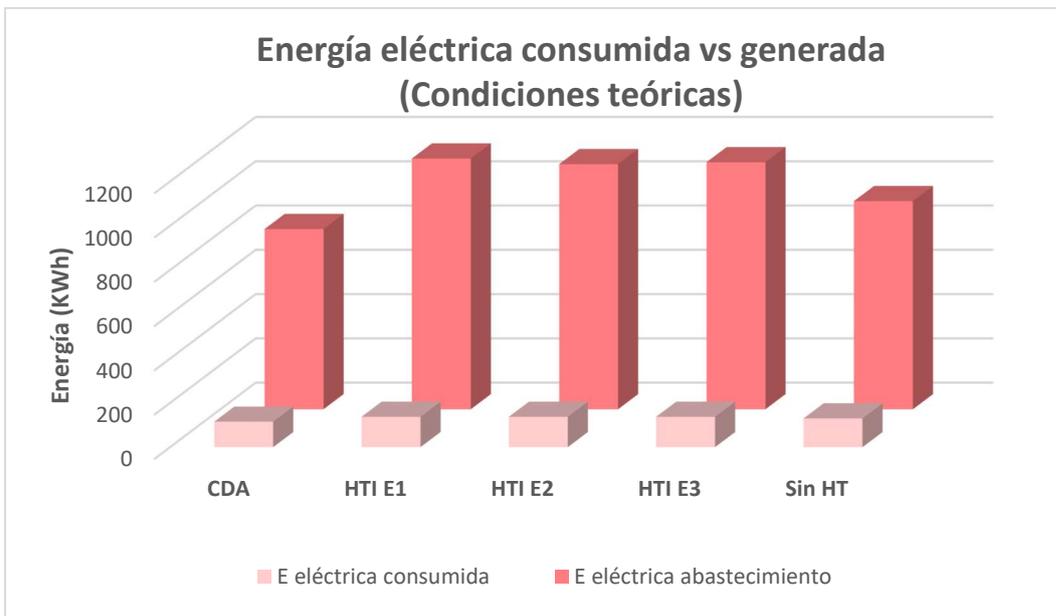


Gráfico 6. Resumen del balance de energía eléctrica para los diferentes escenarios en condiciones teóricas

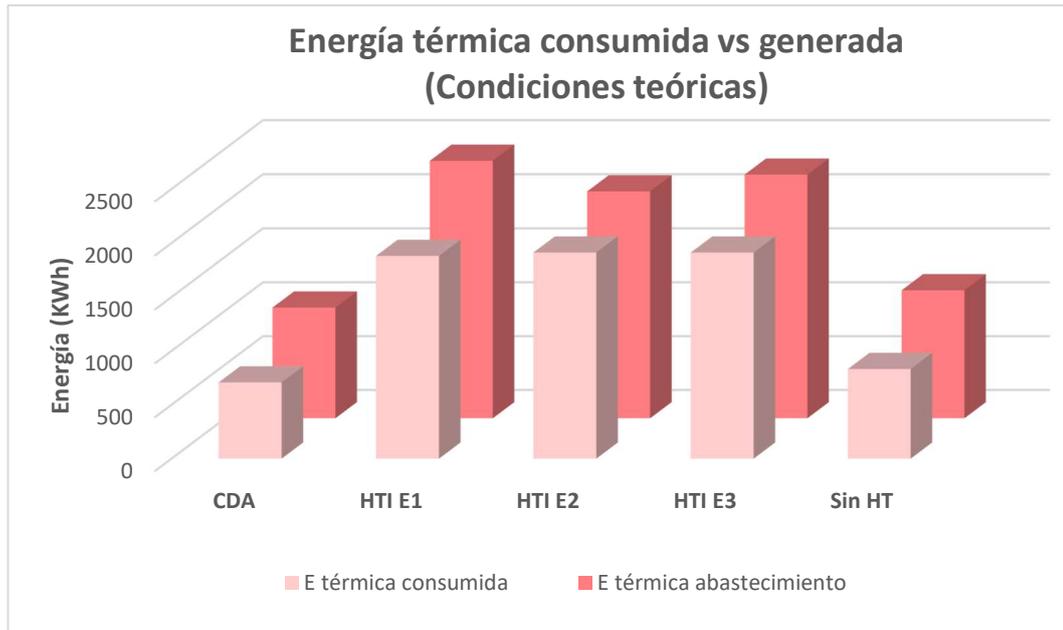


Gráfico 7. Resumen del balance de energía térmica para los diferentes escenarios en condiciones teóricas

Los gráficos anteriores demuestran, además del balance energético positivo al utilizar las condiciones teóricas, que el escenario utilizando hidrólisis térmica intermedia para el tratamiento de los lodos es el que más energía tanto eléctrica como térmica produce. Sin embargo, al profundizar en las condiciones óptimas, se observa que las condiciones del experimento 1 (170°C, 25min) son las que mayor energía producen utilizándose además menos energía para llevar a cabo el proceso.

Por tanto, la conclusión de todos los datos tratados en esta investigación experimental es que el tratamiento de lodos de depuradora utilizando un proceso de hidrólisis intermedia es viable técnicamente, logra acercarse al concepto de economía circular, de sostenibilidad y valorización, y además, medioambientalmente se logra reducir las emisiones de residuos y carga contaminante en ellos maximizando la producción de un recurso utilizado como energía renovable, el biogás. Por tanto, las condiciones óptimas para el tratamiento de lodos de EDAR mediante la implementación del proceso de hidrólisis térmica intermedia serán las mismas que para la hidrólisis térmica como pretratamiento.

7. Bibliografía

- [1] CENTA, “Manual de depuración de aguas residuales urbanas,” *Centa, Secr. Alianza por el agua, Ecol. y Desarro.*, p. 264, 2008, [Online]. Available:
<http://alianzaporelagua.org/documentos/MONOGRAFICO3.pdf>.
- [2] “AQUAVALL – Gestión del Agua en Valladolid.” <http://aquavall.es/> (accessed Oct. 29, 2020).
- [3] “Hidrotec - Servicios de saneamiento y reparación de tuberías.” <http://www.hidrotec.com/> (accessed Feb. 16, 2021).
- [4] Metcalf and Eddy, *Ingeniería de aguas residuales. Volumen 1: Tratamiento, vertido y reutilización*. 1995.
- [5] M. Ambiente, A. Silv, J. Le, M. Rodr, C. Consistorial, and E. Ayuntamiento, “La EDAR de Valladolid tratará también las aguas residuales de Arroyo de la Encomienda y Simancas,” pp. 1–2, 2020, [Online]. Available:
<https://www.valladolid.es/es/actualidad/noticias/edar-valladolid-tratará-aguas-residuales-arroyo-encomienda->.
- [6] María Fernández-Polanco, “Visita EDAR Valladolid,” 2020.
- [7] “Edar Bens SA - Empresa pública de depuración de aguas residuales - Galicia.” <https://edarbens.es/> (accessed Oct. 29, 2020).
- [8] IQTMA, “Apuntes Tecnología Ambiental de Procesos (TAP).”
- [9] G. Zhen, X. Lu, H. Kato, Y. Zhao, and Y. Y. Li, “Overview of pretreatment strategies for enhancing sewage sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: Current advances, full-scale application and future perspectives,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, no. November 2016, pp. 559–577, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.187.
- [10] Aquavall, “Pliego de prescripciones técnicas particulares para la contratación del servicio de gestión de residuos calificados como lodos de depuradora procedentes de tratamientos biológicos de la EPEL agua de Valladolid.” https://contrataciondelestado.es/wps/wcm/connect/72950a1b-1e74-4f05-88e3-f232eaf341f8/DOC20180518110142EPE+68_18+PPT.pdf?MOD=AJPERES (accessed Oct. 29, 2020).
- [11] C. Schaum, D. Lensch, and P. Cornel, “Evaluation of the energetic potential of sewage sludge by characterization of its organic composition,” *Water Sci. Technol.*, vol. 73, no. 12, pp. 3072–3079,

- 2016, doi: 10.2166/wst.2016.188.
- [12] “Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.” <https://www.miteco.gob.es/es/> (accessed Oct. 29, 2020).
- [13] V. Khanh Nguyen et al., “Review on pretreatment techniques to improve anaerobic digestion of sewage sludge,” *Fuel*, vol. 285, no. August 2020, p. 119105, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119105.
- [14] A. Demirbas, V. Coban, O. Taylan, and M. Kabli, “Aerobic digestion of sewage sludge for waste treatment,” *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 39, no. 10, pp. 1056–1062, 2017, doi: 10.1080/15567036.2017.1289282.
- [15] R. S. Ramalho, “Tratamiento de aguas residuales,” *Barcelona Editor. Reverté S. A.*, 2014.
- [16] FAO, MINENERGIA, PNUD, and GEF, “Manual del Biogás,” *Proy. CHI/00/G32*, p. 120, 2011, [Online]. Available: <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>.
- [17] S. Liu, N. Zhu, and L. Y. Li, “The one-stage autothermal thermophilic aerobic digestion for sewage sludge treatment,” *Chem. Eng. J.*, vol. 174, no. 2–3, pp. 564–570, 2011, doi: 10.1016/j.cej.2011.09.043.
- [18] M. Garrido-Baserba, M. Molinos-Senante, J. M. Abelleira-Pereira, L. A. Fdez-Güelfo, M. Poch, and F. Hernández-Sancho, “Selecting sewage sludge treatment alternatives in modern wastewater treatment plants using environmental decision support systems,” *J. Clean. Prod.*, vol. 107, pp. 410–419, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.11.021.
- [19] P. Neumann, S. Pesante, M. Venegas, and G. Vidal, “Developments in pre-treatment methods to improve anaerobic digestion of sewage sludge,” *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 15, no. 2, pp. 173–211, 2016, doi: 10.1007/s11157-016-9396-8.
- [20] P. Munisamy, M. Ravichandran, S. D. Natarajan, and C. Varadhaaraju, “Biological aspects of anaerobic digestion and its kinetics: An overview,” *J. Microbiol. Biotechnol. Food Sci.*, vol. 6, no. 4, pp. 1090–1097, 2017, doi: 10.15414/jmbfs.2017.6.4.1090-1097.
- [21] I. D. Villalobos, “Digestión anaerobia y producción de biometano,” *Ingeniería Ambiental*. .
- [22] A. Steinhauser, *Biomass to Biofuels Nanotechnology for the Energy Challenge Biofuels Catalysis for Renewables Energy Demand and Climate Change*. .
- [23] “Energías renovables.” <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables> (accessed Oct. 29, 2020).

- [24] S. Wang, G. Q. Lu, and G. J. Millar, "Carbon dioxide reforming of methane to produce synthesis gas over metal-supported catalysts: State of the art," *Energy and Fuels*, vol. 10, no. 4, pp. 896–904, 1996, doi: 10.1021/ef950227t.
- [25] MMB, "El sector del biogás agroindustrial en España," *Dir. Gen. Recur. agrícolas y Ganad.*, p. 89, 2010.
- [26] E. de I. I. de V. Eil, "Apuntes de Tecnología Energética."
- [27] Ministerio de Industria Turismo y comercio, *Resolución de 22 de septiembre de 2011, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se modifica el protocolo de detalle PD-01 «medición» de las normas de gestión técnica del sistema gasista*. España.
- [28] M. R. Atelge et al., "A critical review of pretreatment technologies to enhance anaerobic digestion and energy recovery," *Fuel*, vol. 270, no. January, p. 117494, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117494.
- [29] S. Pilli, P. Bhunia, S. Yan, R. J. LeBlanc, R. D. Tyagi, and R. Y. Surampalli, "Ultrasonic pretreatment of sludge: A review," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 18, no. 1, pp. 1–18, 2011, doi: 10.1016/j.ultsonch.2010.02.014.
- [30] H. Li, Y. Jin, R. B. Mahar, Z. Wang, and Y. Nie, "Effects and model of alkaline waste activated sludge treatment," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 11, pp. 5140–5144, 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.09.019.
- [31] Y. Lin, D. Wang, S. Wu, and C. Wang, "Alkali pretreatment enhances biogas production in the anaerobic digestion of pulp and paper sludge," *J. Hazard. Mater.*, vol. 170, no. 1, pp. 366–373, 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.04.086.
- [32] W. Fang et al., "Effect of alkaline addition on anaerobic sludge digestion with combined pretreatment of alkaline and high pressure homogenization," *Bioresour. Technol.*, vol. 168, pp. 167–172, 2014, doi: 10.1016/j.biortech.2014.03.050.
- [33] L. Appels, J. Baeyens, J. Degève, and R. Dewil, "Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 34, no. 6, pp. 755–781, 2008, doi: 10.1016/j.pecs.2008.06.002.
- [34] S. Mirmasoumi, S. Ebrahimi, and R. K. Saray, "Enhancement of biogas production from sewage sludge in a wastewater treatment plant: Evaluation of pretreatment techniques and co-digestion under mesophilic and thermophilic conditions," *Energy*, vol. 157, pp. 707–717, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.06.003.
- [35] E. Neyens and J. Baeyens, "A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability," *J. Hazard. Mater.*, vol. 98, no. 1–3,

pp. 51–67, 2003, doi: 10.1016/S0304-3894(02)00320-5.

- [36] U. Kepp, I. Machenbach, N. Weisz, and O. E. Solheim, “Enhanced stabilisation of sewage sludge through thermal hydrolysis - Three years of experience with full scale plant,” *Water Sci. Technol.*, vol. 42, no. 9, pp. 89–96, 2000, doi: 10.2166/wst.2000.0178.
- [37] I. Díaz, A. Díaz-Curbelo, N. Pérez-Lemus, F. Fdz-Polanco, and S. I. Pérez-Elvira, “Traceability of organic contaminants in the sludge line of wastewater treatment plants: A comparison study among schemes incorporating thermal hydrolysis treatment and the conventional anaerobic digestion,” *Bioresour. Technol.*, vol. 305, no. February, p. 123028, 2020, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123028.
- [38] M. Bjerg-Nielsen, A. J. Ward, H. B. Møller, and L. D. M. Ottosen, “Influence on anaerobic digestion by intermediate thermal hydrolysis of waste activated sludge and co-digested wheat straw,” *Waste Manag.*, vol. 72, pp. 186–192, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2017.11.021.
- [39] “Standard Methods.” <https://www.standardmethods.org/> (accessed Nov. 11, 2020).
- [40] F. Fdz-Polanco, P. Nieto, S. Pérez-Elvira, F. P. van der Zee, M. Fdz-Polanco, and P. A. García, “Automated equipment for anaerobic sludge parameters determination,” *Water Sci. Technol.*, vol. 52, no. 1–2, pp. 479–485, 2005, doi: 10.2166/wst.2005.0556.
- [41] I. Sapkaite, E. Barrado, F. Fdz-Polanco, and S. I. Pérez-Elvira, “Optimization of a thermal hydrolysis process for sludge pre-treatment,” *J. Environ. Manage.*, vol. 192, pp. 25–30, 2017, doi: 10.1016/j.jenvman.2017.01.043.
- [42] C. Holliger *et al.*, “Towards a standardization of biomethane potential tests,” *Water Sci. Technol.*, vol. 74, no. 11, pp. 2515–2522, 2016, doi: 10.2166/wst.2016.336.
- [43] I. Angelidaki *et al.*, “Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays,” *Water Sci. Technol.*, vol. 59, no. 5, pp. 927–934, 2009, doi: 10.2166/wst.2009.040.
- [44] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments Eighth Edition*, vol. 2. 2012.
- [45] “Manual de usuario - Sistema de ayuda de Statgraphics.” <https://statgraphics.net/manual-de-usuario/> (accessed Nov. 23, 2020).
- [46] “Centrífugas decanter para una separación óptima | Decanter Flottweg.” <https://www.flottweg.com/es/la-gama-de-productos/centrifugas/> (accessed Dec. 17, 2020).

- [47] “Agitador de baja velocidad 4410 | Xylem España.” <https://www.xylem.com/es-es/brands/flygt/flygt-productos/4410-low-speed-mixer> (accessed Dec. 17, 2020).
- [48] “Libro del Web de Química del NIST.” <https://webbook.nist.gov/chemistry/> (accessed Jan. 01, 2021).
- [49] “Lodos de depuración | Medio Ambiente | Junta de Castilla y León.” <https://medioambiente.jcyl.es/web/es/calidad-ambiental/lodos-depuracion.html> (accessed Dec. 19, 2020).
- [50] Jefatura del Estado, *Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados*. España, 2011.
- [51] J. I. Carlos Rey De España, “TEXTO CONSOLIDADO Última modificación: 12 de mayo de 2016 LEGISLACIÓN CONSOLIDADA.”
- [52] Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, *Real Decreto 13130/1990 por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario*. España, 1990.
- [53] Ministerio de Agricultura Alimentación y Medioambiente, *Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación*. España, 2013.
- [54] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, *Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero*. España, 2020.

8. Anexos

8.1 ANEXO I: Datos experimentales

A continuación, se presentan los datos de presiones y temperaturas recogidos en el laboratorio a lo largo de los 32 días de experimento.

Anexos

Pressure (unit:mbar)		1(22/09)		2(23/09)		3(24/09)		4(25/09)		5(26/09)		6(27/09)	
		PI	Pf										
170°C-25min-10.8%	1	360	10	310	15	265	15	140	0	95	15	90	15
	2	365	20	315	20	250	20	135	15	95	15	90	15
	3	375	20	325	15	255	15	130	10	95	20	95	15
210°C-5min-10.8%	4	330	15	345	10	260	20	140	10	100	15	90	15
	5	330	20	350	15	260	15	145	20	110	15	95	10
	6	335	15	345	15	265	20	135	15	105	15	95	15
210°C-8min-10.8%	7	300	10	285	0	360	20	190	20	115	15	105	15
	8	345	20	335	15	320	15	140	20	110	15	100	15
	9	325	20	320	15	355	15	170	15	110	15	100	15
Blanco-10.8%	10	195	15	115	20	105	15	70	15	60	15	60	15
	11	195	20	120	15	105	15	65	15	55	15	65	15
	12	195	15	115	15	105	15	70	15	55	15	65	20
Inoculum	13	160	15	75	15	65	15	35	15	40	15	45	15
	14	155	15	75	15	60	15	35	15	35	10	40	20
	15	160	15	80	20	60	15	45	20	35	10	45	15

		7(28/09)		8(29/09)		9(30/09)		10(01/10)		11(02/10)		14(05/10)	
		PI	Pf	PI	Pf	PI	Pf	PI	Pf	PI	Pf	PI	Pf
170°C-25min-10.8%	1	75	10	70	10	75	10	70	15	80	15	90	0
	2	80	15	75	0	70	20	70	15	75	15	85	15
	3	80	15	75	15	65	20	75	15	80	20	100	20
210°C-5min-10.8%	4	75	15	80	15	75	20	80	15	70	20	95	15
	5	70	15	75	15	75	15	70	20	80	10	85	15
	6	70	15	80	15	75	15	70	15	75	15	95	15
210°C-8min-10.8%	7	75	15	80	15	75	15	75	15	75	15	95	15
	8	70	15	85	20	80	15	75	15	75	15	90	15
	9	75	15	80	15	75	15	70	15	80	0	85	15
Blanco-10.8%	10	55	15	60	15	55	15	55	15	65	15	75	15
	11	50	10	55	15	55	15	55	15	60	15	75	10
	12	55	15	55	15	55	15	55	15	60	15	70	15
Inoculum	13	40	15	35	15	40	15	40	15	40	15	40	10
	14	40	15	35	15	40	15	40	15	45	10	40	15
	15	40	15	35	10	40	15	40	15	45	15	40	15

		16(07/10)		18(09/10)		22(13/10)		24(15/10)		29(20/10)		32(23/10)	
		PI	Pf										
170°C-25min-10.8%	1	80	15	85	10	95	10	55	10	90	15	55	15
	2	85	15	75	15	100	10	60	15	90	15	55	15
	3	85	15	70	15	95	10	60	15	90	15	60	15
210°C-5min-10.8%	4	90	15	85	15	105	0	60	0	100	15	65	15
	5	85	15	75	15	100	15	65	15	100	15	70	15
	6	85	15	75	15	105	15	65	15	105	15	65	15
210°C-8min-10.8%	7	80	10	70	15	100	15	65	10	100	15	60	15
	8	85	15	80	10	95	15	60	15	100	15	55	15
	9	90	15	80	15	105	10	60	20	100	15	60	15
Blanco-10.8%	10	70	15	70	0	90	15	55	20	105	15	60	15
	11	60	15	75	15	95	15	55	15	95	15	60	15
	12	65	15	75	15	90	15	55	10	90	20	55	15
Inoculum	13	40	10	40	10	55	15	35	15	60	15	40	15
	14	40	10	45	15	50	10	40	15	65	15	40	15
	15	40	15	45	10	55	10	40	15	65	15	40	15

Anexos

Composition

		1(22/09)				2(23/09)				3(24/09)				4(25/09)			
		CO2	O2	N2	CH4	CO2	O2	N2	CH4	CO2	O2	N2	CH4	CO2	O2	N2	CH4
170°C-25min-10.8%	1	24,02	1,08	7,68	67,22	20,49	1,17	6,38	71,95	21,60	0,91	5,54	71,95	22,57	0,71	5,12	71,60
	2	23,37	1,44	8,56	66,64	21,07	0,86	5,02	73,05	21,93	0,67	4,30	73,10	23,67	0,65	4,30	71,39
	3	23,77	0,91	6,81	68,51	20,20	0,86	4,86	74,08	21,60	0,75	4,47	73,19	23,02	0,56	3,88	72,54
210°C-5min-10.8%	4	22,79	1,64	9,95	65,62	20,03	1,04	5,16	73,77	22,22	0,63	4,16	73,00	23,26	0,53	3,79	72,43
	5	24,08	1,15	8,09	66,68	24,11	0,98	5,57	69,34	21,78	0,6054	3,77	73,84	23,17	0,56	3,48	72,79
	6	22,68	1,69	9,72	65,92	20,11	0,83	4,54	74,52	21,24	0,74	4,08	73,94	23,05	0,49	3,29	73,18
210°C-8min-10.8%	7	32,56	1,13	7,63	58,68	26,18	0,91	4,73	68,18	21,01	0,61	3,29	75,09	23,78	0,54	3,22	72,45
	8	27,26	1,05	7,42	64,27	22,36	0,76	4,20	72,68	21,55	0,59	3,35	74,51	24,15	0,44	2,90	72,51
	9	28,96	1,73	9,99	59,32	23,51	0,84	4,45	71,20	20,91	0,57	3,11	75,41	24,48	0,48	2,86	72,18
Blanco-10.8%	10	30,03	3,49	19,14	47,35	28,48	1,83	9,90	59,79	27,41	1,12	6,75	64,73	25,92	0,99	5,87	67,22
	11	31,54	2,50	16,46	49,50	29,40	2,00	10,83	57,77	28,28	1,21	7,16	63,35	27,37	0,88	5,84	65,90
	12	30,46	2,34	16,31	50,89	28,63	1,74	10,63	59,00	27,07	1,28	7,65	64,00	28,10	0,97	6,55	64,39
Inoculum	13	35,34	3,69	21,12	39,84	29,68	2,28	13,22	54,82	25,83	1,72	9,91	62,54	24,31	1,72	9,74	64,23
	14	32,01	5,28	28,34	34,36	28,22	2,36	14,61	54,81	25,06	1,92	10,89	62,14	23,77	1,50	9,63	65,10
	15	31,07	4,75	27,58	36,59	27,50	2,25	14,22	56,03	24,18	1,90	11,18	62,73	23,38	1,39	8,97	66,26

		6(26/09)				7(27/09)				8(28/09)				9(29/09)			
		CO2	O2	N2	CH4												
170°C-25min-10.8%	1	26,34	0,76	5,61	67,30	24,26	0,64	4,99	70,11	24,24	0,55	4,68	70,54	24,23	0,79	5,54	69,44
	2	24,22	0,44	3,82	71,51	24,76	0,48	4,03	70,72	25,08	0,45	3,94	70,54	25,34	0,36	3,61	70,34
	3	24,06	0,60	4,16	71,18	24,35	0,46	3,66	71,54	25,26	0,48	3,78	70,47	24,76	0,45	3,67	71,13
210°C-5min-10.8%	4	26,88	0,47	3,82	68,83	24,55	0,53	3,88	71,04	24,83	0,43	3,58	71,16	25,06	0,36	3,30	71,28
	5	26,23	0,53	3,71	69,54	24,87	0,39	3,18	71,56	24,85	0,37	3,18	71,60	24,98	0,32	2,96	71,74
	6	23,51	0,60	3,75	72,14	24,28	0,48	3,41	71,83	24,82	0,46	3,25	71,47	24,80	0,40	3,19	71,60
210°C-8min-10.8%	7	24,16	0,42	2,89	72,53	24,58	0,34	2,69	72,40	24,77	0,44	2,98	71,81	24,88	0,32	2,70	72,10
	8	24,90	0,41	2,81	71,88	24,97	0,38	2,80	71,85	25,11	0,38	2,81	71,70	25,23	0,36	2,75	71,66
	9	23,99	0,50	2,94	72,57	24,91	0,33	2,40	72,37	25,11	0,37	2,62	71,91	25,27	0,31	2,46	71,96
Blanco-10.8%	10	26,80	0,91	5,69	66,60	25,10	0,71	4,78	69,41	24,87	0,69	4,68	69,76	24,53	0,58	4,22	70,67
	11	26,80	0,91	5,79	66,50	26,25	0,60	4,53	68,63	25,81	0,69	4,81	68,70	25,27	0,87	5,36	68,51
	12	25,30	0,93	5,99	67,78	24,75	0,84	5,57	68,84	24,68	0,66	4,87	69,79	24,29	0,69	4,91	70,11
Inoculum	13	24,69	0,54	5,38	69,38	23,26	1,26	7,73	67,75	23,06	0,91	6,42	69,61	22,23	1,06	6,84	69,87
	14	23,36	0,76	6,50	69,39	22,55	1,13	7,77	68,56	22,09	1,16	7,76	68,99	21,93	1,23	7,87	68,96
	15	22,47	1,25	8,54	67,74	22,23	1,00	7,49	69,29	21,75	1,12	7,65	69,48	21,47	1,00	7,06	70,47

		10(30/09)				11(01/10)				13(02/10)				15(05/10)			
		CO2	O2	N2	CH4												
170°C-25min-10.8%	1	25,01	0,50	4,50	69,99	25,52	0,45	4,38	69,66	25,51	0,50	4,58	69,42	24,60	0,49	4,40	70,51
	2	25,40	0,40	3,76	70,44	25,75	0,40	3,80	70,05	26,15	0,45	4,01	69,39	25,48	0,26	3,27	71,03
	3	25,32	0,29	3,13	71,26	25,29	0,44	3,52	70,74	25,72	0,48	3,90	69,90	25,03	0,35	3,33	71,28
210°C-5min-10.8%	4	25,28	0,39	3,42	70,91	25,55	0,34	3,18	70,93	26,57	0,34	3,34	69,75	25,39	0,38	3,38	70,85
	5	25,37	0,37	3,21	71,05	26,00	0,32	3,07	70,60	26,33	0,36	3,24	70,08	25,37	0,31	2,98	71,34
	6	25,01	0,51	3,62	70,86	25,92	0,27	2,88	70,92	26,25	0,30	2,99	70,46	25,31	0,39	3,22	71,07
210°C-8min-10.8%	7	25,52	0,34	2,82	71,32	25,69	0,37	2,97	70,97	26,13	0,41	3,21	70,25	25,40	0,30	2,75	71,55
	8	25,93	0,30	2,58	71,19	26,08	0,32	2,71	70,90	27,10	0,27	2,60	70,03	25,72	0,30	2,64	71,34
	9	25,47	0,34	2,44	71,75	26,08	0,30	2,47	71,16	26,13	0,44	3,02	70,41	25,34	0,31	2,57	71,78
Blanco-10.8%	10	24,78	0,53	4,02	70,67	24,50	0,50	3,90	71,10	24,87	0,47	3,81	70,86	23,81	0,52	3,83	71,85
	11	25,78	0,56	4,27	69,39	25,48	0,57	4,21	69,74	25,57	0,62	4,43	69,37	24,31	0,46	3,70	71,52
	12	24,50	0,64	4,67	70,18	24,72	0,45	3,95	70,89	24,73	0,56	4,38	70,32	23,35	0,56	4,11	71,98
Inoculum	13	22,19	0,83	5,83	71,15	22,67	1,02	6,57	69,74	22,33	0,73	5,48	71,45	21,52	0,72	5,26	72,50
	14	21,65	1,18	7,23	69,95	21,91	0,96	6,69	70,44	21,98	0,85	6,31	70,86	21,12	0,71	5,51	72,67
	15	22,19	0,64	5,78	71,39	21,27	1,17	7,50	70,06	21,52	0,70	5,80	71,99	20,92	0,59	5,18	73,30

		17(07/10)				20(09/10)				22(13/10)				25(15/10)			
		CO2	O2	N2	CH4												
170°C-25min-10.8%	1	25,80	0,29	3,71	70,21	25,88	0,54	4,61	68,97	25,56	0,47	4,12	69,85	26,41	0,21	3,31	70,08
	2	25,92	0,48	4,05	69,56	26,50	0,26	3,29	69,95	25,70	0,33	3,36	70,60	26,66	0,33	3,42	69,60
	3	25,74	0,39	3,50	70,37	26,34	0,28	3,13	70,26	25,68	0,28	2,99	71,05	26,53	0,30	3,14	70,03
210°C-5min-10.8%	4	25,88	0,32	3,16	70,65	26,42	0,26	2,93	70,39	25,45	0,30	2,92	71,33	26,52	0,20	2,60	70,68
	5	26,08	0,29	2,94	70,69	26,71	0,27	2,89	70,13	25,78	0,29	2,83	71,07	26,45	0,16	2,37	70,01
	6	26,12	0,32	3,02	70,53	26,29	0,30	2,85	70,57	25,65	0,25	2,68	71,42	26,19	0,24	2,60	70,97
210°C-8min-10.8%	7	26,28	0,29	2,71	70,71	26,62	0,20	2,43	70,75	25,85	0,26	2,55	71,34	26,25	0,49	3,41	69,85
	8	26,09	0,37	2,86	70,68	26,51	0,24	2,42	70,84	26,32	0,20	2,22	71,27	26,82	0,21	2,24	70,73
	9	25,94	0,27	2,39	71,40	26,28	0,22	2,28	71,22	25,73	0,30	2,47	71,50	26,79	0,23	2,25	70,73
Blanco-10.8%	10	24,01	0,42	3,45	72,12	23,79	0,51	3,73	71,97	23,42	0,29	2,84	73,44	24,34	0,24	2,63	72,79
	11	24,78	0,55	3,98	70,70	24,92	0,38	3,31	71,40	24,03	0,35	3,05	72,57	24,89	0,35	3,02	71,74
	12	23,78	0,51	3,85	71,87	24,17	0,45	3,65	71,73	23,53	0,36	3,17	72,94	24,22	0,39	3,18	72,22
Inoculum	13	21,61	0,82	5,46	72,11	21,63	0,47	4,15	73,75	20,74	0,63	4,38	74,25	21,34	0,52	4,16	73,97
	14	21,21	0,67	5,22	72,90	21,04	0,59	4,79	73,58	20,67	0,45	4,14	74,73	21,07	0,58	4,60	73,75
	15	21,09	0,61	5,11	73,19	20,87	0,80	5,34									

8.2 ANEXO II: Resultados producción y productividad de metano

A continuación, se presentan los resultados de: producción de metano, producción acumulada de metano, productividad acumulada de metano (productividad bruta), productividad acumulada de metano sin inóculo (productividad neta).

Methane (mL)

t (d)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
170°C-25min-10.8%	1	12,87	24,35	33,92	38,68	42,08	44,87	47,13	49,34	51,76	53,98	56,38
	2	12,94	24,40	33,34	37,71	40,75	43,57	46,01	48,25	50,88	52,74	54,95
	3	13,66	25,68	35,02	39,46	42,68	45,53	47,97	50,24	52,13	54,20	56,62
210°C-5min-10.8%	4	11,52	24,46	34,17	38,79	42,09	44,92	47,19	49,66	51,92	54,18	56,22
	5	11,70	23,87	33,49	38,53	41,86	44,90	47,19	49,48	51,74	53,81	56,04
	6	11,74	24,82	34,65	39,13	42,58	45,64	47,73	50,21	52,47	54,54	56,79
210°C-8min-10.8%	7	9,36	19,34	33,71	40,26	43,93	47,39	49,69	52,18	54,45	56,72	58,96
	8	11,79	23,97	36,06	40,88	44,32	47,56	49,66	52,33	54,60	56,86	59,10
	9	10,25	21,61	35,25	41,20	44,87	48,14	50,43	52,92	55,21	57,29	59,73
Blanco-10.8%	10	4,91	8,09	11,02	12,98	14,58	16,24	17,72	19,41	20,92	22,43	24,31
	11	5,13	8,21	11,24	12,99	14,41	16,23	17,51	19,15	20,63	22,11	23,77
	12	5,28	8,42	8,78	10,67	12,11	13,94	15,24	16,73	18,22	19,73	21,41
Inoculum	13	3,39	5,14	6,80	7,49	8,41	9,49	10,42	11,16	12,10	13,03	13,98
	14	2,83	4,58	6,07	6,76	7,50	8,59	9,33	10,06	10,99	11,93	13,06
	15	3,11	5,05	6,39	7,44	7,98	1,29	2,21	2,96	4,10	5,03	6,18

Cumulative Methane (mL)

t (d)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
170°C-25min-10.8%	1	12,87	25,26	34,82	39,41	40,44	44,93	47,46	48,93	51,74	53,72	55,94
	2	12,94	25,64	34,60	38,16	41,27	43,63	45,96	48,07	50,76	52,34	54,07
	3	13,66	26,79	35,81	39,93	42,40	45,47	47,23	49,94	51,93	53,62	55,39
210°C-5min-10.8%	4	11,52	25,89	35,33	39,68	41,00	45,15	47,49	50,04	52,04	54,32	55,46
	5	11,70	24,34	35,54	40,07	41,61	45,86	48,17	50,56	52,33	54,07	55,91
	6	11,74	26,36	35,98	40,09	42,97	45,85	47,71	50,27	52,01	54,13	56,03
210°C-8min-10.8%	7	9,36	20,85	37,34	42,58	46,29	49,67	51,56	54,26	55,95	57,94	59,59
	8	11,79	25,51	38,24	42,03	45,11	48,34	50,34	52,98	54,90	56,94	58,47
	9	10,25	23,67	38,70	43,00	46,89	50,03	52,01	54,54	56,67	58,28	60,10
Blanco-10.8%	10	4,91	9,38	13,08	15,55	17,00	19,38	20,96	22,93	24,43	26,09	27,89
	11	5,13	9,06	12,97	15,25	16,80	19,16	20,46	22,04	23,81	25,41	26,93
	12	5,28	9,26	1,57	15,07	17,30	19,40	20,97	22,56	24,08	25,82	27,30
Inoculum	13	3,39	6,41	8,98	9,91	11,62	12,43	13,70	14,49	15,71	16,32	17,67
	14	2,83	6,27	8,59	9,69	11,07	12,03	12,84	13,57	14,69	15,74	16,96
	15	3,11	6,70	8,84	10,40	11,17	12,71	13,67	14,62	15,95	16,58	18,19

Cumulative Methane productivity (mL/g-VS)

t (d)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
170°C-25min-10.8%	1	49,81	97,74	134,77	152,52	156,52	173,89	183,65	189,37	200,24	207,89	216,48
	2	50,06	99,24	133,91	147,68	159,70	168,85	177,85	186,04	196,44	202,57	209,25
	3	52,88	103,68	138,59	154,53	164,10	175,95	182,77	193,25	200,95	207,49	214,36
210°C-5min-10.8%	4	44,57	100,21	136,72	153,54	158,66	174,74	183,80	193,67	201,40	210,23	214,63
	5	45,29	94,20	137,54	155,07	161,01	177,48	186,42	195,65	202,53	209,25	216,37
	6	45,45	102,00	139,25	155,14	166,29	177,42	184,62	194,54	201,27	209,48	216,82
210°C-8min-10.8%	7	36,23	80,70	144,51	164,79	179,13	192,23	199,52	209,98	216,52	224,23	230,61
	8	45,63	98,73	148,00	162,67	174,57	187,06	194,80	205,02	212,46	220,36	226,30
	9	39,68	91,59	149,79	166,39	181,47	193,63	201,28	211,05	219,30	225,55	232,59
Blanco-10.8%	10	19,00	36,30	50,62	60,18	65,80	75,01	81,12	88,72	94,55	100,97	107,92
	11	19,87	35,07	50,20	59,01	65,01	74,16	79,18	85,31	92,13	98,33	104,23
	12	20,42	35,82	6,06	58,31	66,96	75,09	81,16	87,31	93,17	99,94	105,66
Inoculum	13	6,56	12,41	17,38	19,17	22,49	24,05	26,51	28,04	30,39	31,58	34,19
	14	5,48	12,13	16,63	18,76	21,42	23,28	24,85	26,26	28,43	30,45	32,82
	15	6,03	12,97	17,11	20,12	21,61	24,60	26,45	28,28	30,86	32,08	35,19

Methane of inoculum (mL) = Productivity of inoculum * g VS of inoculum added

t (d)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
170°C-25min-10.8%	1	3,39	6,41	8,98	9,91	11,62	12,43	13,70	14,49	15,71	16,32	17,67
	2	2,83	6,27	8,59	9,69	11,07	12,03	12,84	13,57	14,69	15,74	16,96
	3	3,11	6,70	8,84	10,40	11,17	12,71	13,67	14,62	15,95	16,58	18,19
210°C-5min-10.8%	4	3,39	6,41	8,98	9,91	11,62	12,43	13,70	14,49	15,71	16,32	17,67
	5	2,83	6,27	8,59	9,69	11,07	12,03	12,84	13,57	14,69	15,74	16,96
	6	3,11	6,70	8,84	10,40	11,17	12,71	13,67	14,62	15,95	16,58	18,19
210°C-8min-10.8%	7	3,39	6,41	8,98	9,91	11,62	12,43	13,70	14,49	15,71	16,32	17,67
	8	2,83	6,27	8,59	9,69	11,07	12,03	12,84	13,57	14,69	15,74	16,96
	9	3,11	6,70	8,84	10,40	11,17	12,71	13,67	14,62	15,95	16,58	18,19
Blanco-10.8%	10	3,39	6,41	8,98	9,91	11,62	12,43	13,70	14,49	15,71	16,32	17,67
	11	2,83	6,27	8,59	9,69	11,07	12,03	12,84	13,57	14,69	15,74	16,96
	12	3,11	6,70	8,84	10,40	11,17	12,71	13,67	14,62	15,95	16,58	18,19

Cumulative methane productivity without inoculum (mL/g-VS)

t (d)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
170°C-25min-10.8%	1	37,76	72,74	100,69	113,83	112,84	125,93	131,78	134,31	140,45	145,15	148,34
	2	38,02	74,23	99,83	108,98	116,02	120,89	125,97	130,99	136,65	139,83	141,11
	3	40,83	78,67	104,51	115,83	120,41	127,99	130,89	138,20	141,16	144,75	146,23
210°C-5min-10.8%	4	32,52	75,20	102,65	114,84	114,98	126,78	131,93	138,61	141,62	147,49	146,50
	5	33,25	69,19	103,46	116,38	117,33	129,52	134,55	140,60	142,75	146,51	148,24
	6	33,41	76,99	105,17	116,44	122,61	129,46	132,75	139,48	141,48	146,74	148,69
210°C-8min-10.8%	7	24,19	55,69	110,44	126,09	135,45	144,27	147,65	154,92	156,73	161,49	162,48
	8	33,59	73,72	113,92	123,97	130,88	139,11	142,93	149,96	152,67	157,62	158,16
	9	27,64	66,58	115,71	127,70	137,79	145,67	149,41	155,99	159,51	162,81	164,46
Blanco-10.8%	10	6,96	11,29	16,55	21,49	22,12	27,05	29,25	33,67	34,77	38,23	39,79
	11	7,82	10,07	16,13	20,31	21,33	26,20	27,31	30,25	32,34	35,59	36,10
	12	8,38	10,82	-28,01	19,62	23,28	27,14	29,28	32,25	33,38	37,20	37,53

Anexos

Methane (mL)

	t (d)	14	16	18	22	24	29	32
170°C-25min-10.8%	1	59,20	62,18	64,75	67,91	69,59	72,57	74,04
	2	57,60	60,19	62,42	65,61	67,46	70,25	71,72
	3	59,65	62,08	64,14	67,16	69,02	71,83	73,51
210°C-5min-10.8%	4	59,05	61,87	64,49	67,90	70,16	73,91	75,78
	5	58,89	61,52	63,76	66,97	68,83	72,02	74,08
	6	59,81	62,44	64,70	68,12	70,00	73,40	75,27
210°C-8min-10.8%	7	62,00	64,45	66,71	69,93	71,79	75,18	76,87
	8	61,94	64,58	67,02	70,25	71,94	75,14	76,63
	9	62,97	65,82	68,28	71,70	73,58	76,62	78,31
Blanco-10.8%	10	26,61	28,72	30,82	34,34	35,88	39,19	40,91
	11	26,05	27,93	30,21	33,30	34,82	37,89	39,60
	12	23,52	25,43	27,72	30,63	32,16	35,25	36,60
Inoculum	13	14,95	16,10	17,27	19,05	19,84	21,62	22,58
	14	14,22	15,19	16,56	17,95	19,12	21,09	22,07
	15	7,16	8,13	9,29	11,08	12,27	14,25	15,24

Cumulative Methane (mL)

	t (d)	14	16	18	22	24	29	32
170°C-25min-10.8%	1	59,63	62,36	63,82	67,80	69,70	72,75	73,08
	2	57,99	59,37	61,94	65,71	66,63	69,62	70,81
	3	59,52	61,19	63,15	66,89	67,78	70,90	72,29
210°C-5min-10.8%	4	59,16	61,81	64,20	68,47	70,11	73,73	75,44
	5	59,76	61,84	63,59	67,66	68,51	72,21	74,05
	6	59,54	61,71	64,00	68,18	69,64	73,06	74,24
210°C-8min-10.8%	7	63,74	65,44	67,73	71,52	71,89	76,32	77,71
	8	62,41	64,47	67,06	70,69	71,85	75,17	75,87
	9	64,51	67,02	69,32	73,01	74,10	77,85	78,47
Blanco-10.8%	10	30,57	32,80	34,83	39,06	40,26	43,69	44,89
	11	30,05	31,59	34,18	37,82	38,92	42,12	43,63
	12	30,05	31,92	34,15	37,63	38,79	42,07	43,47
Inoculum	13	18,89	19,94	21,57	23,50	24,20	26,10	26,49
	14	18,55	19,58	21,13	22,85	23,73	25,73	26,80
	15	19,49	20,44	21,54	23,81	24,96	26,98	27,90

Cumulative Methane productivity (n

	t (d)	14	16	18	22	24	29	32
170°C-25min-10.8%	1	230,75	241,32	246,99	262,37	269,74	281,52	282,83
	2	224,42	229,78	239,70	254,31	257,84	269,42	274,03
	3	230,35	236,81	244,38	258,85	262,32	274,39	279,77
210°C-5min-10.8%	4	228,94	239,19	248,46	264,99	271,33	285,33	291,94
	5	231,27	239,33	246,10	261,83	265,15	279,43	286,56
	6	230,40	238,82	247,66	263,85	269,50	282,76	287,31
210°C-8min-10.8%	7	246,66	253,24	262,10	276,80	278,21	295,34	300,75
	8	241,54	249,51	259,52	273,57	278,08	290,91	293,60
	9	249,67	259,37	268,26	282,55	286,77	301,29	303,69
Blanco-10.8%	10	118,30	126,92	134,80	151,16	155,81	169,08	173,71
	11	116,30	122,24	132,26	146,38	150,61	163,01	168,84
	12	116,30	123,52	132,14	145,63	150,13	162,80	168,22
Inoculum	13	36,56	38,59	41,74	45,47	46,82	50,50	51,26
	14	35,90	37,89	40,89	44,22	45,92	49,80	51,87
	15	37,72	39,54	41,69	46,06	48,29	52,20	53,98

Methane of inoculum (mL) = Product

	t (d)	14	16	18	22	24	29	32
170°C-25min-10.8%	1	18,89	19,94	21,57	23,50	24,20	26,10	26,49
	2	18,55	19,58	21,13	22,85	23,73	25,73	26,80
	3	19,49	20,44	21,54	23,81	24,96	26,98	27,90
210°C-5min-10.8%	4	18,89	19,94	21,57	23,50	24,20	26,10	26,49
	5	18,55	19,58	21,13	22,85	23,73	25,73	26,80
	6	19,49	20,44	21,54	23,81	24,96	26,98	27,90
210°C-8min-10.8%	7	18,89	19,94	21,57	23,50	24,20	26,10	26,49
	8	18,55	19,58	21,13	22,85	23,73	25,73	26,80
	9	19,49	20,44	21,54	23,81	24,96	26,98	27,90
Blanco-10.8%	10	18,89	19,94	21,57	23,50	24,20	26,10	26,49
	11	18,55	19,58	21,13	22,85	23,73	25,73	26,80
	12	19,49	20,44	21,54	23,81	24,96	26,98	27,90

Cumulative methane productivity w

	t (d)	14	16	18	22	24	29	32
170°C-25min-10.8%	1	157,30	163,97	164,11	171,88	175,72	179,86	178,09
	2	150,97	152,43	156,82	163,81	163,82	167,76	169,28
	3	156,90	159,46	161,50	168,35	168,30	172,72	175,03
210°C-5min-10.8%	4	155,49	161,85	175,01	174,49	177,31	183,67	187,20
	5	157,82	161,98	172,65	171,33	171,13	177,77	181,82
	6	156,95	161,47	174,21	173,35	175,48	181,10	182,57
210°C-8min-10.8%	7	173,21	175,90	179,22	186,30	184,19	193,68	196,01
	8	168,09	172,16	176,64	183,07	184,06	189,25	188,86
	9	176,22	182,03	185,38	192,05	192,76	199,63	198,95
Blanco-10.8%	10	44,85	49,57	51,92	60,66	61,79	67,42	68,96
	11	42,85	44,89	49,38	55,88	56,59	61,35	64,10
	12	42,85	46,17	49,26	55,13	56,11	61,14	63,48

8.3 ANEXO III: Resultados producción y productividad de biogás

A continuación, se presentan los resultados de: producción de biogás, producción acumulada de biogás, productividad acumulada de biogás (productividad bruta), productividad acumulada de biogás sin inóculo (productividad neta).

Anexos

Biogas (mL)

	t (d)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
170°C-25min-10.8%	1	19,15	15,96	13,30	6,65	5,05	3,99	3,19	3,19	3,46	3,19	3,46
	2	19,41	15,69	12,23	6,12	4,25	3,99	3,46	3,19	3,72	2,66	3,19
	3	19,94	16,22	12,76	6,12	4,52	3,99	3,46	3,19	2,66	2,93	3,46
210°C-5min-10.8%	4	17,55	17,55	13,30	6,38	4,79	3,99	3,19	3,46	3,19	3,19	2,93
	5	17,55	17,55	13,03	6,91	4,79	4,25	3,19	3,19	3,19	2,93	3,19
	6	17,82	17,55	13,30	6,12	4,79	4,25	2,93	3,46	3,19	2,93	3,19
210°C-8min-10.8%	7	15,96	14,63	19,15	9,04	5,05	4,79	3,19	3,46	3,19	3,19	3,19
	8	18,35	16,75	16,22	6,65	4,79	4,52	2,93	3,72	3,19	3,19	3,19
	9	17,29	15,96	18,08	8,24	5,05	4,52	3,19	3,46	3,19	2,93	3,46
Blanco-10.8%	10	10,37	5,32	4,52	2,93	2,39	2,39	2,13	2,39	2,13	2,13	2,66
	11	10,37	5,32	4,79	2,66	2,13	2,66	1,86	2,39	2,13	2,13	2,39
	12	10,37	5,32	4,79	2,93	2,13	2,66	1,86	2,13	2,13	2,13	2,39
Inoculum	13	8,51	3,19	2,66	1,06	1,33	1,60	1,33	1,06	1,33	1,33	1,33
	14	8,24	3,19	2,39	1,06	1,06	1,60	1,06	1,06	1,33	1,33	1,60
	15	8,51	3,46	2,13	1,60	0,80	1,86	1,33	1,06	1,60	1,33	1,60

Cumulative Biogas (mL)

	t (d)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
170°C-25min-10.8%	1	19,15	35,10	48,40	55,05	60,10	64,09	67,28	70,47	73,93	77,12	80,58
	2	19,41	35,10	47,33	53,45	57,71	61,69	65,15	68,34	72,07	74,73	77,92
	3	19,94	36,17	48,93	55,05	59,57	63,56	67,01	70,20	72,86	75,79	79,25
210°C-5min-10.8%	4	17,55	35,10	48,40	54,78	59,57	63,56	66,75	70,20	73,40	76,59	79,51
	5	17,55	35,10	48,13	55,05	59,83	64,09	67,28	70,47	73,66	76,59	79,78
	6	17,82	35,37	48,66	54,78	59,57	63,82	66,75	70,20	73,40	76,32	79,51
210°C-8min-10.8%	7	15,96	30,58	49,73	58,77	63,82	68,61	71,80	75,26	78,45	81,64	84,83
	8	18,35	35,10	51,32	57,97	62,76	67,28	70,20	73,93	77,12	80,31	83,50
	9	17,29	33,24	51,32	59,57	64,62	69,14	72,33	75,79	78,98	81,91	85,36
Blanco-10.8%	10	10,37	15,69	20,21	23,14	25,53	27,92	30,05	32,44	34,57	36,70	39,36
	11	10,37	15,69	20,48	23,14	25,26	27,92	29,78	32,18	34,30	36,43	38,83
	12	10,37	15,69	20,48	23,40	25,53	28,19	30,05	32,18	34,30	36,43	38,83
Inoculum	13	8,51	11,70	14,36	15,42	16,75	18,35	19,68	20,74	22,07	23,40	24,73
	14	8,24	11,43	13,83	14,89	15,96	17,55	18,61	19,68	21,01	22,34	23,93
	15	8,51	11,97	14,09	15,69	16,49	18,35	19,68	20,74	22,34	23,67	25,26

Cumulative Biogas productivity (mL/g-VS)

	t (d)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
170°C-25min-10.8%	1	74,10	135,84	187,30	213,03	232,58	248,02	260,37	272,72	286,10	298,45	311,82
	2	75,13	135,84	183,18	206,85	223,32	238,76	252,14	264,48	278,89	289,18	301,53
	3	77,18	139,96	189,36	213,03	230,52	245,96	259,34	271,69	281,98	293,30	306,68
210°C-5min-10.8%	4	67,92	135,84	187,30	212,00	230,52	245,96	258,31	271,69	284,04	296,39	307,71
	5	67,92	135,84	186,27	213,03	231,55	248,02	260,37	272,72	285,07	296,39	308,74
	6	68,95	136,87	188,33	212,00	230,52	246,99	258,31	271,69	284,04	295,36	307,71
210°C-8min-10.8%	7	61,75	118,35	192,45	227,44	246,99	265,51	277,86	291,24	303,59	315,94	328,29
	8	71,01	135,84	198,62	224,35	242,87	260,37	271,69	286,10	298,45	310,80	323,14
	9	66,89	128,64	198,62	230,52	250,08	267,57	279,92	293,30	305,65	316,97	330,35
Blanco-10.8%	10	40,14	60,72	78,21	89,53	98,80	108,06	116,29	125,55	133,79	142,02	152,31
	11	40,14	60,72	79,24	89,53	97,77	108,06	115,26	124,52	132,76	140,99	150,25
	12	40,14	60,72	79,24	90,56	98,80	109,09	116,29	124,52	132,76	140,99	150,25
Inoculum	13	16,47	22,64	27,79	29,84	32,42	35,50	38,08	40,14	42,71	45,28	47,85
	14	15,95	22,13	26,76	28,82	30,87	33,96	36,02	38,08	40,65	43,22	46,31
	15	16,47	23,16	27,27	30,36	31,90	35,50	38,08	40,14	43,22	45,80	48,88

Biogas of inoculum (mL) = Productivity of inoculum * g VS of inoculum added

	t (d)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
170°C-25min-10.8%	1	8,51	11,70	14,36	15,42	16,75	18,35	19,68	20,74	22,07	23,40	24,73
	2	8,24	11,43	13,83	14,89	15,96	17,55	18,61	19,68	21,01	22,34	23,93
	3	8,51	11,97	14,09	15,69	16,49	18,35	19,68	20,74	22,34	23,67	25,26
210°C-5min-10.8%	4	8,51	11,70	14,36	15,42	16,75	18,35	19,68	20,74	22,07	23,40	24,73
	5	8,24	11,43	13,83	14,89	15,96	17,55	18,61	19,68	21,01	22,34	23,93
	6	8,51	11,97	14,09	15,69	16,49	18,35	19,68	20,74	22,34	23,67	25,26
210°C-8min-10.8%	7	8,51	11,70	14,36	15,42	16,75	18,35	19,68	20,74	22,07	23,40	24,73
	8	8,24	11,43	13,83	14,89	15,96	17,55	18,61	19,68	21,01	22,34	23,93
	9	8,51	11,97	14,09	15,69	16,49	18,35	19,68	20,74	22,34	23,67	25,26
Blanco-10.8%	10	8,51	11,70	14,36	15,42	16,75	18,35	19,68	20,74	22,07	23,40	24,73
	11	8,24	11,43	13,83	14,89	15,96	17,55	18,61	19,68	21,01	22,34	23,93
	12	8,51	11,97	14,09	15,69	16,49	18,35	19,68	20,74	22,34	23,67	25,26

Cumulative Biogas productivity without inoculum (mL/g-VS)

	t (d)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
170°C-25min-10.8%	1	41,51	90,56	132,76	153,68	169,12	178,04	185,59	193,82	201,71	208,91	216,46
	2	42,54	90,56	128,64	147,51	159,86	168,78	177,35	185,59	194,50	199,65	206,17
	3	44,60	94,68	134,82	153,68	167,06	175,98	184,56	192,79	197,59	203,77	211,31
210°C-5min-10.8%	4	35,33	90,56	132,76	152,65	167,06	175,98	183,53	192,79	199,65	206,85	212,34
	5	35,33	90,56	131,73	153,68	168,09	178,04	185,59	193,82	200,68	206,85	213,37
	6	36,36	91,59	133,79	152,65	167,06	177,01	183,53	192,79	199,65	205,82	212,34
210°C-8min-10.8%	7	29,16	73,07	137,90	168,09	183,53	195,53	203,08	212,34	219,20	226,41	232,93
	8	38,42	90,56	144,08	165,00	179,41	190,39	196,91	207,20	214,06	221,26	227,78
	9	34,30	83,36	144,08	171,18	186,61	197,59	205,14	214,40	221,26	227,44	234,98
Blanco-10.8%	10	7,55	15,44	23,67	30,19	35,33	38,08	41,51	46,65	49,40	52,49	56,94
	11	7,55	15,44	24,70	30,19	34,30	38,08	40,48	45,62	48,37	51,46	54,89
	12	7,55	15,44	24,70	31,22	35,33	39,11	41,51	45,62	48,37	51,46	54,89

Biogas (mL)

		t (d)	14	16	18	22	24	29	32
170°C-25min-10.8%	1		3,99	4,25	3,72	4,52	2,39	4,25	2,13
	2		3,72	3,72	3,19	4,52	2,66	3,99	2,13
	3		4,25	3,46	2,93	4,25	2,66	3,99	2,39
210°C-5min-10.8%	4		3,99	3,99	3,72	4,79	3,19	5,32	2,66
	5		3,99	3,72	3,19	4,52	2,66	4,52	2,93
	6		4,25	3,72	3,19	4,79	2,66	4,79	2,66
210°C-8min-10.8%	7		4,25	3,46	3,19	4,52	2,66	4,79	2,39
	8		3,99	3,72	3,46	4,52	2,39	4,52	2,13
	9		4,52	3,99	3,46	4,79	2,66	4,25	2,39
Blanco-10.8%	10		3,19	2,93	2,93	4,79	2,13	4,52	2,39
	11		3,19	2,66	3,19	4,25	2,13	4,25	2,39
	12		2,93	2,66	3,19	3,99	2,13	4,25	1,86
Inoculum	13		1,33	1,60	1,60	2,39	1,06	2,39	1,33
	14		1,60	1,33	1,86	1,86	1,60	2,66	1,33
	15		1,33	1,33	1,60	2,39	1,60	2,66	1,33

Cumulative Biogas (mL)

		t (d)	14	16	18	22	24	29	32
170°C-25min-10.8%	1		84,56	88,82	92,54	97,06	99,46	103,71	105,84
	2		81,64	85,36	88,55	93,07	95,73	99,72	101,85
	3		83,50	86,96	89,88	94,14	96,80	100,79	103,18
210°C-5min-10.8%	4		83,50	87,49	91,21	96,00	99,19	104,51	107,17
	5		83,77	87,49	90,68	95,20	97,86	102,38	105,31
	6		83,77	87,49	90,68	95,47	98,13	102,91	105,57
210°C-8min-10.8%	7		89,09	92,54	95,73	100,25	102,91	107,70	110,09
	8		87,49	91,21	94,67	99,19	101,58	106,10	108,23
	9		89,88	93,87	97,33	102,12	104,77	109,03	111,42
Blanco-10.8%	10		42,55	45,47	48,40	53,19	55,31	59,83	62,23
	11		42,02	44,68	47,87	52,12	54,25	58,50	60,90
	12		41,75	44,41	47,60	51,59	53,72	57,97	59,83
Inoculum	13		26,06	27,66	29,25	31,65	32,71	35,10	36,43
	14		25,53	26,86	28,72	30,58	32,18	34,84	36,17
	15		26,59	27,92	29,52	31,91	33,51	36,17	37,50

Cumulative Biogas productivity (mL/g-VS)

		t (d)	14	16	18	22	24	29	32
170°C-25min-10.8%	1		327,26	343,73	358,14	375,63	384,89	401,36	409,59
	2		315,94	330,35	342,70	360,19	370,48	385,92	394,15
	3		323,14	336,52	347,84	364,31	374,60	390,04	399,30
210°C-5min-10.8%	4		323,14	338,58	352,99	371,51	383,86	404,45	414,74
	5		324,17	338,58	350,93	368,43	378,72	396,21	407,53
	6		324,17	338,58	350,93	369,46	379,75	398,27	408,56
210°C-8min-10.8%	7		344,76	358,14	370,48	387,98	398,27	416,80	426,06
	8		338,58	352,99	366,37	383,86	393,13	410,62	418,85
	9		347,84	363,28	376,66	395,18	405,47	421,94	431,20
Blanco-10.8%	10		164,66	175,98	187,30	205,82	214,06	231,55	240,82
	11		162,60	172,89	185,24	201,71	209,94	226,41	235,67
	12		161,57	171,86	184,21	199,65	207,88	224,35	231,55
Inoculum	13		50,43	53,51	56,60	61,23	63,29	67,92	70,50
	14		49,40	51,97	55,57	59,17	62,26	67,41	69,98
	15		51,46	54,03	57,12	61,75	64,83	69,98	72,55

Biogas of inoculum (mL) = Productivity of inoculum * g VS of inoculum added

		t (d)	14	16	18	22	24	29	32
170°C-25min-10.8%	1		26,06	27,66	29,25	31,65	32,71	35,10	36,43
	2		25,53	26,86	28,72	30,58	32,18	34,84	36,17
	3		26,59	27,92	29,52	31,91	33,51	36,17	37,50
210°C-5min-10.8%	4		26,06	27,66	29,25	31,65	32,71	35,10	36,43
	5		25,53	26,86	28,72	30,58	32,18	34,84	36,17
	6		26,59	27,92	29,52	31,91	33,51	36,17	37,50
210°C-8min-10.8%	7		26,06	27,66	29,25	31,65	32,71	35,10	36,43
	8		25,53	26,86	28,72	30,58	32,18	34,84	36,17
	9		26,59	27,92	29,52	31,91	33,51	36,17	37,50
Blanco-10.8%	10		26,06	27,66	29,25	31,65	32,71	35,10	36,43
	11		25,53	26,86	28,72	30,58	32,18	34,84	36,17
	12		26,59	27,92	29,52	31,91	33,51	36,17	37,50

Cumulative Biogas productivity without inoculum (mL/g-VS)

		t (d)	14	16	18	22	24	29	32
170°C-25min-10.8%	1		226,41	237,38	245,27	254,19	257,97	264,48	267,57
	2		215,09	224,01	229,84	238,76	243,56	249,05	252,14
	3		222,29	230,18	234,98	242,87	247,68	253,16	257,28
210°C-5min-10.8%	4		222,29	232,24	240,13	250,08	256,94	267,57	272,72
	5		223,32	232,24	238,07	246,99	251,79	259,34	265,51
	6		223,32	232,24	238,07	248,02	252,82	261,40	266,54
210°C-8min-10.8%	7		243,90	251,79	257,62	266,54	271,35	279,92	284,04
	8		237,73	246,65	253,51	262,43	266,20	273,75	276,83
	9		246,99	256,94	263,80	273,75	278,55	285,07	289,18
Blanco-10.8%	10		63,81	69,64	74,44	84,39	87,13	94,68	98,80
	11		61,75	66,55	72,38	80,27	83,02	89,53	93,65
	12		60,72	65,52	71,35	78,21	80,96	87,48	89,53

8.4 ANEXO IV: Experimentos Taguchi

A continuación, se presenta la tabla de las 27 ejecuciones para los experimentos de hidrólisis térmica dados por el asistente de diseño de experimentos del software Statgraphics 18, donde se encuentran las condiciones de tiempo, temperatura, concentración de sólidos volátiles de la muestra, y los datos de la eliminación de sólidos volátiles y la producción de metano obtenidas experimentalmente en el laboratorio para cada una las ejecuciones.

	T	time	Cvs	VS removal	BMP
	°C	min	%	%	NmLCH₄ / gVS
1	130	45	10,8	6,73	221,696
2	130	45	10,8	6,73	214,701
3	130	45	10,8	6,73	205,127
4	170	25	10,8	11,95	234,886
5	170	25	10,8	11,95	225,612
6	170	25	10,8	11,95	221,577
7	210	5	10,8	23,54	240,345
8	210	5	10,8	23,54	236,453
9	210	5	10,8	23,54	239,882
10	130	25	8,1	4,71	226,902
11	130	25	8,1	4,71	207,939
12	130	25	8,1	4,71	216,071
13	170	5	8,1	10,51	198,259
14	170	5	8,1	10,51	189,463
15	170	5	8,1	10,51	192,232
16	210	45	8,1	33,28	261,834
17	210	45	8,1	33,28	246,463
18	210	45	8,1	33,28	261,068
19	130	5	5,4	4,00	192,717
20	130	5	5,4	4,00	197,481
21	130	5	5,4	4,00	192,824
22	170	45	5,4	13,36	241,321
23	170	45	5,4	13,36	235,675
24	170	45	5,4	13,36	219,701
25	210	25	5,4	24,04	239,568
26	210	25	5,4	24,04	243,958
27	210	25	5,4	24,04	255,759