



**UNIVERSIDAD DE MURCIA**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

Estudio de Aditivos para la Optimización de  
Procesos de Digestión Anaerobia

**Dña. María José Escasaín Martínez**  
**2017**



**UNIVERSIDAD DE MURCIA**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**ESTUDIO DE ADITIVOS PARA LA  
OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS DE  
DIGESTIÓN ANAEROBIA.**

**TESIS DOCTORAL**

**María José Escasáin Martínez**

**2017**





UNIVERSIDAD DE  
MURCIA

D. Antonio Bódalo Santoyo, Catedrático de Universidad Jubilado y, actualmente, Profesor Colaborador Honorario, del Área de Ingeniería Química en el Departamento de Ingeniería Química, AUTORIZA:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada "Estudio de aditivos para la optimización de procesos de digestión anaerobia", realizada por Dña. M<sup>a</sup> José Escasaín Martínez, bajo mi inmediata dirección y supervisión, y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad de Murcia.

En Murcia, a 16 de Enero de 2017







UNIVERSIDAD DE  
MURCIA

Dña. María Gómez Gómez, Profesora Contratada Doctor del Área de Ingeniería Química en el Departamento de Ingeniería Química,  
AUTORIZA:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada "Estudio de aditivos para la optimización de procesos de digestión anaerobia", realizada por Dña. M<sup>a</sup> José Escasaín Martínez, bajo mi inmediata dirección y supervisión, y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad de Murcia.

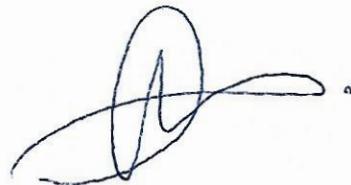
En Murcia, a 16 de Enero de 2017

*Manuel Escasaín*



Trabajo presentado para optar al Grado  
de Doctora por la  
Universidad de Murcia.

Murcia, a 16 de Enero de 2017.

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized letter 'J' with a horizontal stroke extending to the right.

**Mª José Escasaín Martínez**  
Ingeniera Química



A mi marido y a mi niña...



A mi Teo y a mi pequeña M<sup>a</sup> José, porque sin vosotros nada tiene sentido, porque sin vosotros esto no hubiera sido posible, porque sin vosotros yo no sería nadie, porque vosotros sois mi vida, mi ayer, mi hoy y mi mañana. Pequeña mía, sólo con verte mis penas se transforman en alegría, mis problemas en soluciones, mi tristeza en felicidad. ¡Qué feliz soy a vuestro lado! Os amo.

A mis padres, Carlos y M<sup>a</sup> José, por vuestro apoyo incondicional, por vuestros consejos, por vuestro esfuerzo, porque lo que soy hoy es gracias a vosotros, por querer a mi hija tanto como a mí y cuidarla y educarla como si de una nueva hija vuestra se tratara.

A mis hermanos, Elisa y Carlos, vuestras risas son mis risas, vuestras ilusiones son mis ilusiones, sois parte de mí.

A mi madrina, por quererme tanto. ¡Qué ilusión me hace que tú seas también la madrina de mi pequeña! y a mi Carla, nunca supe todo lo que se podía querer a una sobrina hasta que llegaste tú.

A mi abuela Josefa, desde el cielo sé que te alegras de todas mis alegrías, de mis éxitos, nunca superaré que te fueras de mi lado, pero desde el cielo sé que me apoyas y me das cariño continuamente.

A mis suegros, Teodoro y Pepi y a mi cuñado Antonio, gracias por acogerme en vuestra familia como de una hija y una hermana se tratara.

A Antonio Bódalo, Elisa Gómez y María Gómez, los mejores profesores que he tenido y tendré nunca. Vuestra ayuda, vuestro cariño, vuestra paciencia... es infinita. Gracias por todo.

A mis amigas de siempre, Esther, Mar, Paula, M<sup>a</sup> Teresa, Ana, ... por muchos años que pasen, por muchos kilómetros que nos separen, siempre juntas.

Al Centro Tecnológico de la Energía y del Medio Ambiente, y a su directora. También a mis compañeros de trabajo, Mari, Andrés, Anahí, Paqui, Raquel, J. Miguel, Curro y Dani, después de tantos años, no somos compañeros, somos amigos. Gracias por tantos y tantos buenos momentos.



## Índice.

Índice.....	I
Abreviaturas. ....	V
Abstract. ....	XI
Resumen.....	XIII
1.- Introducción.....	1
2.- Objetivos. ....	5
2.1.- Generales. ....	5
2.2.- Específicos.....	6
2.2.1.- Estudio del potencial de biometanización en discontinuo.....	6
2.2.2.- Estudio de la digestión anaerobia en semicontinuo. ....	7
3.- Antecedentes. ....	9
3.1.- Digestión Anaerobia. ....	9
3.1.1.- Breve Reseña Histórica. ....	9
3.1.2.- Proceso. ....	10
3.2.- Bacterias metanogénicas: Methanosarcinas. ....	12
3.3.- Necesidades metabólicas de las bacterias del género Methanosarcina. ....	15
3.3.1.- Macro y micronutrientes.....	16
3.3.2.- Levaduras.....	25
3.3.3.- Metanol.....	26
3.3.4.- Residuos.....	27
3.3.5.- Lixiviados.....	29
3.3.6.- Lodos.....	30
3.3.6.1.- Lodos mixtos. ....	31
3.3.6.2.- Lodos digeridos. ....	31
3.3.7.- Biogás. ....	32
4.- Materiales y métodos. ....	33
4.1.- Materiales. ....	33
4.1.1.- En el estudio del potencial de biometanización en discontinuo. ....	33
4.1.2.- En el estudio del proceso de digestión anaerobia en semicontinuo. ....	34
4.1.3.- Reactivos para la fase experimental. ....	37

4.1.3.1.- Lodos de depuradoras urbanas (EDAR A, B y C).....	37
4.1.3.2.- Levadura, metanol y residuos (aditivos). ....	37
4.2.- Métodos. ....	38
4.2.1.- Ensayos con levadura y metanol. ....	38
4.2.1.1.- En el estudio del potencial de biometanización en discontinuo.....	38
a) Selección de componentes.....	38
b) Experimentos programados.....	41
c) Características de los componentes. ....	44
d) Metodología de ensayo. ....	45
4.2.1.2.- En el estudio del proceso de digestión anaerobia en semicontinuo con levadura. ....	47
a) Metodología de los ensayos. ....	47
b) Caracterización de los componentes. ....	47
c) Arranque, puesta en marcha y operación con los digestores. ....	50
d) Seguimiento y control del proceso. ....	53
4.2.2.- Ensayos con residuos.....	55
4.2.2.1.- En el estudio del potencial de biometanización en discontinuo.....	55
a) Selección de residuos.....	55
b) Experimentos programados.....	56
c) Características de los componentes. ....	59
d) Metodología de ensayo. ....	60
4.2.2.2.- En el estudio del proceso de digestión anaerobia en semicontinuo con residuo industrial. ....	61
a) Metodología de los ensayos. ....	61
b) Caracterización de los componentes. ....	62
c) Arranque, puesta en marcha y operación con los digestores. ....	64
d) Seguimiento y control del proceso. ....	68
<b>5.- Resultados. ....</b>	<b>71</b>
5.1.- Ensayos con levadura y metanol.....	71
5.1.1.- Estudio del potencial de biometanización en discontinuo.....	71
5.1.1.1.- Bloque de Ensayos 1. ....	71
5.1.1.2.- Bloque de Ensayos 2. ....	77
5.1.1.3.- Bloque de Ensayos 3. ....	81
5.1.1.4.- Balance y simulación de costes.....	85
5.1.2.- Estudio del proceso de digestión anaerobia en semicontinuo con levadura. ....	90

5.1.2.1.- Producción de biogás.....	90
5.1.2.2.- Parámetros de control.....	98
a) Alcalinidad total.....	98
b) Ácidos grasos volátiles.....	99
c) Nitrógeno total y amoniacal.....	101
d) Relación carbono / nitrógeno.....	103
e) pH y Conductividad Eléctrica.....	104
f) Rendimiento de eliminación de materia orgánica.....	106
5.1.2.3.- Viabilidad técnico económica.....	112
5.2.- Ensayos con residuos.....	116
5.2.1.- Estudio del potencial de biometanización en discontinuo.....	116
5.2.1.1.- Bloque de Ensayos 4.....	116
5.2.1.2.- Bloque de Ensayos 5.....	119
5.2.1.3.- Bloque de Ensayos 6.....	123
5.2.1.4.- Balance y simulación de costes.....	125
5.2.2.- Estudio del proceso de digestión anaerobia en semicontinuo con residuo industrial.....	131
5.2.2.1.- Producción de Biogás.....	131
5.2.2.2.- Parámetros de control.....	139
a) Alcalinidad total.....	139
b) Ácidos grasos volátiles.....	140
c) Nitrógeno total amoniacal.....	142
d) pH y Conductividad Eléctrica.....	144
e) Rendimiento de eliminación de materia orgánica.....	145
5.2.2.3.-Viabilidad técnico económica.....	152
6.- Conclusiones.....	157
7.- Referencias.....	163
8.- Índice de figuras.....	169
9.- Índice de tablas.....	175
10.- Anexos.....	183
ANEXO 1: Simulaciones del proceso de digestión anaerobia en discontinuo con el uso de levadura y metanol como aditivos.....	189
ANEXO 2: Simulaciones del proceso de digestión anaerobia en discontinuo con el uso de residuos como aditivos.....	235

ANEXO 3: Simulaciones del proceso de digestión anaerobia en semicontinuo con uso de levadura.....	273
ANEXO 4: Simulaciones del proceso de digestión anaerobia en semicontinuo con el uso de residuo industrial.....	287

## **Abreviaturas.**

ACH: Ácido acético.

Alc<sub>st</sub>: Alcalinidad Total (mg CaCO<sub>3</sub>/L).

alim.: Alimentación.

AGV: Ácidos Grasos Volátiles (mg CH<sub>3</sub>-COOH/L).

Art: Artículo.

ATP: Adenosín trifosfato.

BMP: Potencial de Biometanización (L/g sv).

C<sub>consumo eléctrico</sub>: Coste consumo eléctrico (€/día).

CE: Conductividad Eléctrica (mS/cm).

C<sub>gest. lodo.</sub>: Coste de gestión de lodos (€/día).

C<sub>Total</sub>: Coste total (€/día).

C/N: Relación carbono / nitrógeno.

Comb.: Combinación

DQO: Demanda Química de Oxígeno (mgO<sub>2</sub>/L).

DEY: Deyecciones ganaderas.

EDAR: Estación Depuradora de Aguas Residuales.

$E_{elec,cog.}$ : Energía eléctrica generada en cogeneración (KWh/día).

Elim.: Eliminación.

F: Fango o lodo.

Fi: Fase i.

$L_{alim.}$ : Volumen de alimentación (L).

$L_{dig.}$ : Lodos digeridos.

LER: Lista Europea de Residuos.

Lev: Levadura.

LIX: Lixiviado.

$L_{mixt.}$ : Lodos mixtos.

m: masa de lodo deshidratada.

MAT: Residuos de matadero.

m.f.: masa fresca (masa hidratada).

Mi: Caudal másico de la mezcla i (Kg/día).

M1: Caudal másico del lodo a digestión (Kg/día).

M2: Caudal másico del lodo a digestión (Kg/día).

N. A.: No analizado.

N. D.: No denominado.

NL: Litros en condiciones normales.

Nml: Mililitros en condiciones normales.

N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>: Nitrógeno Amoniacal (g/L).

N<sub>T</sub>: Nitrógeno total (g/L).

OLR: Carga Orgánica de Alimentación (g<sub>sv</sub>/L.día).

P: Peso de aditivo (Kg).

P<sub>alim</sub>: Peso de alimentación (Kg).

Prom.: Promedio.

p/v: Relación peso / volumen.

Q<sub>A</sub>: Caudal de agua residual tratado en EDAR (m<sup>3</sup>/día).

Ref.: Referencias.

RD: Real Decreto.

RI: Residuo Industrial.

rpm: revoluciones por minuto.

RSU: Residuos sólidos urbanos.

Rto: Rendimiento.

Rto. eli. SV: Rendimiento eliminación de sólidos volátiles (%).

%Rsv: % Reducción de sólidos volátiles en digestión (%).

Su: Semana u.

simb: Símbolo.

ST: Sólidos Totales (%).

ST I. dig: Sólidos Totales en el lodo digerido (%).

SSV: Sólidos Volátiles en Suspensión (%).

SV: Sólidos Volátiles(%).

SV I. dig: Sólidos Volátiles en el lodo digerido (%).

SV<sub>elim</sub>: Sólidos Volátiles Eliminados (%).

TRH: Tiempo de retención hidráulico en digestión.

Uds.: Unidades.

V: Residuos vegetales.

V<sub>Bio</sub>: Volumen de biogás (L).

V<sub>Bio acu</sub>: Volumen de biogás acumulado (L).

V<sub>CH4</sub>: Volumen de metano (L).

$V_{\text{gas}}$ : Producción de biogás (L).

v/v: Relación de volúmenes.

w/w: Relación de pesos.



## **Abstract.**

The aim of this work is to explore the improvement of both biogas production as well as anaerobic digestion process itself of sewage sludge (EDAR). More specifically, the addition of nutrients, or non-hazardous waste, allows the use of biogas farms exploitation for the production of electricity in cogeneration system. Moreover, this second case ensures that they are properly managed.

In the phase of bibliographic research, a comprehensive review (of the state of the art) of the anaerobic digestion of sewage sludge from waste-water treatment plant has been made. Moreover, its specific application for the search of nutrients or waste which fostered the growth of *Methanosarcinas* bacterial species was also investigated due to the fact that they are the only known anaerobic methanogenic capable of producing methane using the three viable methanogenic routes. The search of possible waste addiction to anaerobic digesters has a dual objective. On one hand, the improvement of the anaerobic digestion. On the other hand, a new activity for EDAR could be possible given that they could become management companies of these wastes.

Two work lines have been developed at the experimental part. One of them consists of laboratory experiments with the use of a Bioprocess Control equipment which operates with 15, 0.5 liters batch bioreactors. The other one is an experimental pilot plant using two ten-liters digesters which operate in semi-continuous regime. In both cases, there are economic technical feasibility studies that allow us to actually simulate and calculate the global process to establish if this waste water process adding additives is cheaper, than the standard procedure of anaerobic digester without them.

The first experimental step, operating in discontinuous regime consists of six test series using alternatively sludge produced in three water treatment plants and, as additives: yeast, methanol, cattle manure, leachate, slaughter waste and industrial waste, respectively. On the other hand, the experimental step operating in semi-continuous regime was developed using the two most favorable additives

from the discontinuous experimentations (yeast and industrial waste) in two test set with sludge from the three named water treatment plants.

The measured magnitudes in each test series of the six studied in discontinuous regime have been, respectively, the % of elimination of volatile solid, the biomethanation potential ( $ML_{CH_4}/g_{SV_{additives}}$ ) and the volume of methane produced referred to the content of volatile solid in the feeding ( $ML_{CH_4}/g_{SV_{feed}}$ ). Likewise, all biodegradability curves of evolution of accumulated volume of  $CH_4$  v.s. time in each experiment have made possible to detect the cases in which there is inhibition of the process as well as situations with positive economic performance in the simulation of a real plant, according to the results, operating with each sludge under such conditions.

All additives and sludge at the beginning, and the end, of the experiments have been typified, referred to total solids, volatile solids, pH, conductivity, DQO, total nitrogen, volatile fatty acid and alkalinity, respectively.

Most of the tests (discontinuous and continuous regime) have verified the applicability and efficiency of the used nutrients and waste in real plants, thanks to an Excel simulation with the real data of the plants used at the same time that the ones obtained in this experimentation.

## **Resumen.**

Lo que se ha pretendido alcanzar con este trabajo es el estudio de la mejora, tanto en la producción de biogás, como en el propio proceso de digestión anaeróbica de lodos de depuradoras (EDAR), bien con el aporte de aditivos como levadura y metanol o de residuos no peligrosos, permitiendo en este segundo caso, una buena gestión de los mismos, y en ambos, el aprovechamiento del biogás para producir electricidad en un sistema de cogeneración.

En la fase bibliográfica, se ha hecho una revisión exhaustiva del estado del arte de la digestión anaerobia de lodos de depuradoras de aguas residuales y de su aplicación específica para la búsqueda de posibles aditivos para el crecimiento de las especies bacterianas *Methanosarcinas*, únicos metanógenos anaerobios conocidos e investigados capaces de producir metano usando las tres rutas metanogénicas posibles. La búsqueda de posibles residuos para añadir a los digestores anaerobios tiene un doble objetivo: la posible mejora del proceso de digestión anaerobia y una nueva vía de actividad para las EDAR ya que se podrían convertir en empresas gestoras de los mismos.

En la parte experimental se han desarrollado dos líneas de trabajo: una a escala laboratorio con el uso de un equipo de Bioprocess Control, que opera con 15 birreactores de 0,5 litros, en régimen discontinuo, y otra a escala piloto utilizando dos digestores de 10 litros cada uno, operando en régimen semicontinuo. Dentro de cada parte, hay estudios de viabilidad técnico económica que permiten simular la planta y calcular el proceso para establecer si el precio de gestión de agua residual es más barato con el proceso habitual de digestión anaerobia en digestores sin aditivos o añadiéndole algún aditivo a los mismos.

La fase experimental primera, operando en régimen discontinuo, consta de seis bloques de ensayos en los que se han usado alternativamente lodos de tres depuradoras y: levadura, metanol, deyecciones ganaderas, lixiviado, residuo de matadero, residuo industrial, como aditivos. En la fase experimental en régimen semicontinuo se han utilizado dos aditivos; constando de dos bloques de ensayos con lodos también de las tres depuradoras, y utilizado los dos aditivos

que en ambos ensayos en discontinuo resultaron más favorables a nivel técnico y económico: levadura y residuo industrial.

Las magnitudes medidas en cada uno de los seis bloques de ensayos en discontinuo han sido, respectivamente, el % de eliminación de sólidos volátiles, el potencial de biometanización ( $ML_{CH_4}/g_{SVaditivos}$ ) y el volumen de metano, referido a los sólidos volátiles presentes en la alimentación ( $ML_{CH_4}/g_{SValim}$ ). Asimismo, se muestran todas las curvas de biodegradabilidad de evolución del volumen acumulado de  $CH_4$  frente al tiempo en cada uno de los experimentos, los cuales han permitido detectar las zonas y los casos en que hay inhibición del proceso así como las situaciones con rendimiento económico positivo, según los resultados, en la simulación de la operación de una planta real, operando con cada uno de los lodos en dichas condiciones.

Todos los aditivos y lodos, inicialmente, durante los ensayos, y al finalizar los mismos, han sido caracterizados con referencia a: sólidos totales, sólidos volátiles, pH, conductividad, DQO, nitrógeno total, ácidos grasos volátiles y alcalinidad, respectivamente.

En la mayor parte de los bloques de ensayos (tanto en régimen discontinuo como semicontinuo) se ha podido comprobar qué aplicabilidad y rendimientos tendrían a escala real los aditivos usados, gracias a una simulación, que se realiza en un programa en Excel, donde se han usado los datos reales de las plantas y en la cual se introducen los resultados obtenidos en los procesos experimentales llevados a cabo.

*“La mitad está hecha cuando tienen buen principio las cosas”.* **Fernando de Rojas.**

## **1.- Introducción.**

Los digestores anaerobios de las EDAR operan generalmente con el objetivo de asegurar la estabilización y la reducción de contaminantes presentes en los lodos procedentes de las etapas previas de depuración, dejando en un segundo plano la maximización en la producción de biogás como producto del propio proceso, así como la gestión en la EDAR de posibles residuos que pueden llegar a mejorar la producción y la calidad del mismo.

La cogeneración a partir del biogás generado en el digestor constituye un valor añadido para las empresas explotadoras de las EDAR. La legislación española en materia de energía estableció en el Real Decreto 1/2012 la suspensión de los procedimientos de preasignación de retribución y la supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, siendo previsiblemente el autoconsumo de energía la opción con mayor viabilidad. El Real Decreto 900/2015, de 9 de octubre, por el que se regulan las condiciones técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo es clave. Actualmente, no se está aplicando en la mayor parte de las Comunidades Autónomas, ya que, en el ámbito de sus competencias, deben adaptarse e implementar sus propias normas para facilitar su aplicación. La Tabla 1.1 resume este RD.

**Tabla 1.1.- Resumen del RD 900/2015.**

CLASIFICACIÓN DE LAS INSTALACIONES (Art 4.1)	
AUTOCONSUMO TIPO 1	AUTOCONSUMO TIPO 2
<p>No estarán inscritas en el Registro de Producción.</p> <p>No pueden cobrar los vertidos a la red.</p> <p>No se pueden conectar a varios consumidores.</p> <p><b>Inscripción:</b>(Art 19,20 y 21) El titular es el obligado, pero puede delegar en los instaladores.</p> <p>- Las de menos de 10 kW en la sección 1ª Registro.</p> <p>- Las de más de 10 kW en la Sección 2ª</p> <p>El Ministerio puede imponer la instalación de dispositivos de vertido 0 (Disposición adicional 5ª).</p>	<p>Estarán inscritas en el Registro de Producción.</p> <p>Pueden cobrar los vertidos a la red.</p> <p>No se pueden conectar a varios consumidores.</p> <p><b>Inscripción:</b> (Art 19, 20 y 21) Deben inscribirse en la Sección 2ª</p> <p>Las instalaciones aisladas, fotovoltaicas o no, de cualquier potencia no están obligadas a inscribirse.</p>
REQUISITOS GENERALES (Art 5)	
Menos de 100 kW de potencia.	Pueden superar los 100 kW de potencia.
La potencia será inferior o igual a la contratada.	La potencia será inferior o igual a la contratada.
Los titulares de la instalación de consumo y de producción coinciden en el mismo titular.	Los titulares del consumo y de la producción pueden ser distintos, pero si existen varias instalaciones de producción, el titular será único para todas ellas.
<p>Cumplirá requisitos técnicos generales y los del RD 1699/2011 que regula la instalación &lt; 100 kW</p> <p>Se considerarán instalaciones sólo de producción</p>	<p>Cumplirá requisitos técnicos generales y los del RD 1699/2011 que regula la instalación de &lt; 100 kW (RD 1955/2000 y RD 413/2014).</p>
La distribuidora puede cortar suministro por incumplimiento normativo o peligro.	La distribuidora puede cortar suministro por incumplimiento normativo o peligro.
<b>INSTALACIÓN DE BATERIAS:</b> Están permitidas si comparten el equipo de medida de la generación neta o de la energía horaria consumida.	<b>INSTALACIÓN DE BATERIAS:</b> Están permitidas si comparten el equipo de medida de la generación neta o de la energía horaria consumida.
<b>Disposición adicional 5ª. Quedan excluidas de autorización administrativa previa las de menos de 100 kW de potencia.</b>	

El presente trabajo de tesis doctoral ha pretendido adquirir información sobre el efecto de los factores ambientales y de nutrientes, complementos vitamínicos, etc., capaces de mejorar el desarrollo metabólico de las bacterias metanogénicas y, por tanto, estimular la producción de biogás mediante el aporte de distintos aditivos (en forma de elementos químicos, residuos, etc.) y, a la vez, buscando aprovechar el proceso de digestión anaerobia como método útil para gestionar residuos de difícil tratamiento, catalogados según los códigos LER (Lista Europea de Residuos) como no peligrosos y llevar a cabo una posible valorización energética de los mismos, utilizando concentraciones previamente estudiadas para que su adición no produzca, en ningún caso, efecto inhibitorio sobre el proceso de digestión anaerobia en desarrollo.



*“Los obstáculos son aquellas cosas aterradoras que ves, cuando pierdes de vista tus objetivos”.* **Hannah More.**

## **2.- Objetivos.**

### 2.1.- Generales.

Esta memoria de Tesis Doctoral ha sido desarrollada en las instalaciones del Centro Tecnológico de la Energía y del Medio Ambiente.

Ha sido estructurada en dos partes; una de estudios previos, y otra experimental y de discusión de resultados.

- *Fase de estudios previos.* Incluye un análisis bibliográfico y de antecedentes para fijar el alcance.
- *Fase experimental.* Se han llevado a cabo dos líneas de trabajo: una a escala laboratorio con el uso de un equipo de medición de Potencial de Biometanización en discontinuo, y otra a escala planta piloto con el uso de dos digestores anaerobios en semicontinuo, simulando operaciones del proceso real, con análisis de viabilidad técnico-económica.

En general, lo que se pretende alcanzar con este trabajo es la mejora de la producción de biogás en la digestión anaerobia de lodos, bien con la adición de aditivos como levadura, metanol, o con la adición de residuos no peligrosos, permitiendo de este modo una mejor gestión de los mismos.

La primera fase implicará la exploración bibliográfica del proceso de digestión anaerobia en los casos donde se estudie el aporte de aditivos al proceso (levaduras, metanol, residuos), bien por tratarse de déficit de los mismos, para estudiar la optimización del propio proceso, o para buscar una nueva forma de gestión de determinados residuos que, a la vez, pudieran provocar una mejora en la producción de biogás.

La segunda, el establecimiento de las condiciones óptimas de operación del proceso de digestión anaerobia para el crecimiento de las bacterias *Methanosarcinas* (responsables de la producción de biogás en la digestión

anaerobia) siendo las variables operacionales con posible influencia en el proceso de metanogénesis las siguientes:

- Tipo de aditivos a añadir.
- Características de la operación de mezcla y disolución.
- Concentración de levaduras, metanol, residuos a aportar y tiempo de contacto y maduración.
- Diseño y programación de experimentos, donde se hayan tenido en cuenta las variables anteriormente citadas y su nivel óptimo de operación.
- Desarrollo de los ensayos en el equipo de medida del potencial de biometanización en discontinuo según el diseño de experimentos realizado y, posteriormente, de una experimentación a escala planta piloto en dos digestores operando en semicontinuo.
- Estudios de viabilidad técnico-económica.

## 2.2.- Específicos.

### 2.2.1.- Estudio del potencial de biometanización en discontinuo.

El objetivo principal de este estudio experimental ha consistido en la selección de aditivos con elevado potencial de producción de biogás, así como de residuos (aditivos) generados en industrias españolas (bien por su alta producción, por su dificultad de tratamiento, o bien por su posible elevada capacidad de generación de biogás). A la vista de su comportamiento, estos materiales serán utilizados en la siguiente fase experimental con operación en semicontinuo en digestores a escala piloto.

Por un lado, con la adición de nutrientes, se pretende estimular el proceso de producción de biogás, en cuanto a que se potencie el crecimiento y metabolismo de las bacterias responsables de la transformación final de los intermedios del proceso de digestión. Por otro, con la adición de aditivos en forma de residuos se persigue una doble función: buscar una nueva forma de gestión de

determinados residuos y, a su vez, estimular el proceso de producción de biogás en los digestores anaerobios.

### 2.2.2.- Estudio de la digestión anaerobia en semicontinuo.

El estudio de potencial de biometanización en discontinuo, ha sido decisivo para descartar los aditivos y residuos con menor interés técnico, permitiendo seleccionar dos aditivos: levadura y un residuo industrial, teniendo en cuenta: rendimiento, logística, disponibilidad y precio.

Tras esta primera parte citada, el objetivo primordial de la segunda, ha sido simular el proceso real de digestión anaerobia, y estudiar la influencia y el comportamiento de la digestión anaerobia a escala piloto al añadir levadura, metanol, o residuos, al mencionado proceso digestivo.

Evidentemente, aparte de incrementar la eficiencia de producción de biogás en el tratamiento de lodos, vía digestión anaeróbica, se considerarán aspectos económicos y de viabilidad técnica, así como la búsqueda de alternativas de gestión de residuos por supuesto no peligrosos, basadas en procesos de valorización y de la ecoeficiencia.



*"Lo que sabemos es una gota de agua;  
lo que ignoramos es el océano". Isaac Newton.*

### **3.- Antecedentes.**

#### **3.1.- Digestión Anaerobia.**

##### **3.1.1.- Breve Reseña Histórica.**

La digestión anaerobia de lodos en los procesos de depuración se encuentra entre las formas de tratamiento biológico de aguas residuales más antiguas, y su origen se puede datar sobre el año 1850, cuando se desarrolló el primer tanque diseñado para la separación y retención de sólidos, siendo una de las primeras instalaciones de los Estados Unidos en emplear digestores independientes, la planta de tratamiento de aguas residuales de Baltimore en Maryland [1].

Por otro lado, el biogás que se obtiene derivado del proceso digestivo anaerobio también ha sido objeto de atención a lo largo de bastantes años:

En 1776 Alessandro Volta, físico italiano, descubrió el "combustible del aire", formado en los sedimentos del fondo de los lagos y ríos.

Dalton, en 1804, estableció la composición química del metano ( $\text{CH}_4$ ) y Beauchamp, en 1868, estableció la presencia de microorganismos en los procesos de producción del mencionado gas.

Propoff, en 1875, descubrió que la formación de biogás sólo se producía en condiciones anaerobias y en 1884, Pasteur investigó sobre la producción de biogás a partir de residuos animales.

En 1910, Sohngen encontró que en la fermentación de materiales orgánicos se produce la reducción de compuestos como el hidrógeno, ácido acético y dióxido de carbono. También demostró que hay reducciones de  $\text{CO}_2$  para formar metano y asumió que el ácido acético es el responsable de la formación de metano. Esta hipótesis, ahora se considera correcta, siendo controvertida durante décadas [2].

En 1914, Reichle Thum, llegó a la conclusión de que el proceso tenía lugar en dos fases: la del ácido y del metano. En 1916, Imhoff, denominó digestión ácida a la etapa de la digestión en que se forma metano.

En 1940, Barker aisló una bacteria (*Omelianski*) que oxida el etanol, el acetato y el metano mientras que, en 1948, Buswell y Sollo, demostraron que el metano procedente del acetato no se produce mediante la reducción de CO<sub>2</sub>.

Jerris en 1956 encontró que el 70% del metano producido se obtuvo a partir de acetato.

Briant en 1967 reportó que hay dos grupos de bacterias que convierten el metano.

También en la India, a partir de la década de los 60, se impulsó notablemente la tecnología de producción de biogás a partir de estiércol bovino con el doble objetivo del aprovechamiento energético y de obtención de biofertilizantes. En China se ha fomentado, desde la década de los 70, la construcción de digestores en programas de ámbito nacional [3].

### 3.1.2.- Proceso.

La digestión anaerobia, o fermentación anaeróbica, es una de las técnicas más habituales para la estabilización y reducción de los lodos generados en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR). Esta tecnología permite minimizar el volumen de este residuo, y además favorece la producción de biogás útil para la generación de energía en una instalación de cogeneración, lo cual se traduce en una reducción de los costes en la operación global de dicha instalación.

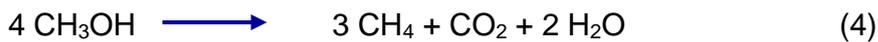
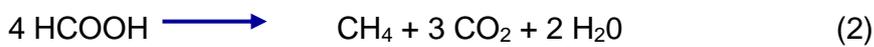
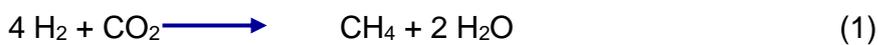
La producción del biogás es un proceso anaerobio que ocurre de forma espontánea en la naturaleza para degradar la materia orgánica, produciendo, por ejemplo, el gas de los pantanos, el gas natural de yacimientos subterráneos o incluso el gas metabólico producido en el estómago de los rumiantes.

En algunas situaciones el biogás generado, adecuadamente tratado, puede satisfacer la demanda eléctrica total de una EDAR, e incluso superarla,

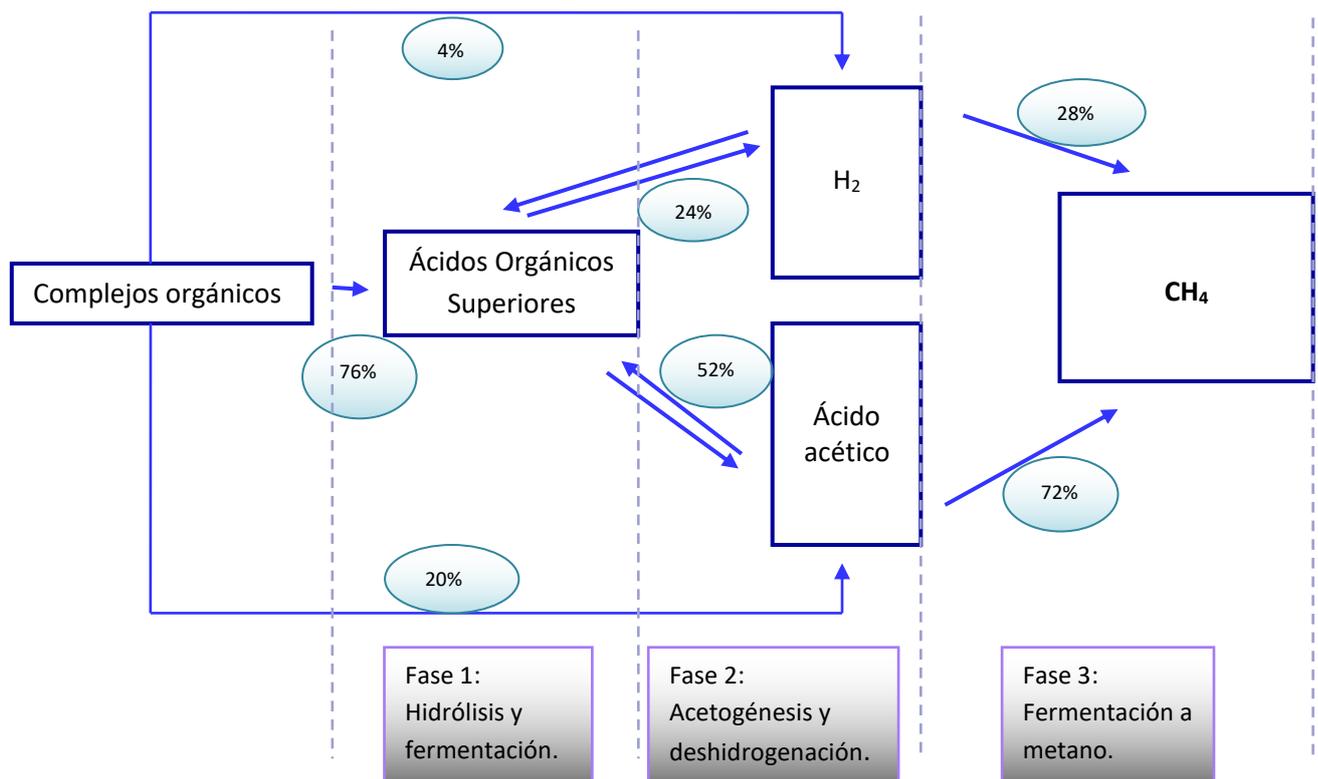
permitiéndose la exportación del excedente generado a la red eléctrica de distribución, según diferentes modelos de retribución económica.

Químicamente, en el proceso de digestión anaerobia, por la acción microbiana, las moléculas orgánicas son descompuestas en condiciones anóxicas a biogás siendo éste un modo adecuado de reducir el contenido orgánico de los biorresiduos [2].

Las reacciones típicas de producción de energía ligadas a estos procesos son [1]:



En un digestor anaerobio, las dos vías principales de producción de metano son: la conversión de hidrógeno y dióxido de carbono en metano y agua, (1) y la conversión de acético en metano y dióxido de carbono (3). Un esquema global y simplificado de estas reacciones se expone en la Figura 3.1 siguiente.



**Figura 3.1.-** Etapas de la digestión anaerobia con flujo de energía. *Adaptación* de [1].

### 3.2.- Bacterias metanogénicas: Methanosarcinas.

La conversión biológica de la materia orgánica de los lodos de depuradora se ha demostrado que ocurre a lo largo de las tres siguientes etapas [1].

Etapa 1: (Hidrólisis). Transformación por vía enzimática de los compuestos de alto peso molecular en compuestos que puedan servir como fuentes de energía y de carbono celular para los microorganismos.

Etapa 2: (Acidogénesis). Conversión bacteriana de los compuestos producidos en la primera etapa en compuestos intermedios de menor peso molecular.

Etapa 3: (Metanogénesis). Conversión bacteriana de los compuestos intermedios en productos finales más simples, principalmente metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), como ya se ha expuesto.

La digestión anaerobia, es un proceso biológico cuya actividad es desarrollada por diversos tipos de organismos anaerobios:

- Grupo bacteriológico 1: Microorganismos que se ocupan de la hidrolización de los polímeros orgánicos y de los lípidos para formar elementos estructurales básicos, como los monosacáridos, los aminoácidos, y compuestos relacionados con los mismos.
- Grupo bacteriológico 2: Bacterias anaerobias que fermentan los productos de la descomposición para producir ácidos orgánicos simples, de los que el que se presenta con mayor frecuencia en los digestores orgánicos es el ácido acético. Este grupo recibe el nombre de no metanogénico, y está formado por bacterias facultativas y anaerobias estrictas, aunque de forma colectiva se conocen como bacterias formadoras de ácidos (*Clostridium spp*, *Peptococcus anaerobus*, *Bifidobacterium spp*, *Desulphovibrio spp*, *Corynebacterium spp*, *Lactobacillus*, *Actinomyces*, *Staphilococcus* y *Escherichia coli*).
- Grupo bacteriológico 3: Microorganismos que convierten el hidrógeno y el ácido acético, originado por las bacterias formadoras de ácidos, en metano y dióxido de carbono. Son bacterias anaerobias estrictas y se las conoce como metanogénicas, o microorganismos metanógenos.

Las bacterias *Methanosarcinas* son una variedad de microorganismos metanógenos pertenecientes al dominio *Archaea*. Son los metanógenos más diversos en términos de fisiología y se encuentran en distintos ambientes, incluyendo: basuras, aguas residuales, fuentes hidrotermales profundas e incluso en el tracto digestivo de diversos ungulados, como vacas, ovejas, cabras, ciervos y también en recientes estudios se ha descubierto su presencia en el tracto del aparato digestivo humano.

Según la afinidad por los componentes, las bacterias metanogénicas se dividen en dos grupos principales:

- *Bacterias acetotróficas*: Son las que forman metano a partir de la reducción de ácido acético o metanol. Son responsables de la producción

del 60-70% de metano a partir del grupo metilo del ácido acético. Las *Methanosarcinas* pertenecen a este grupo de metanógenos. Emplean formiato y acetato como fuentes de energía. También utilizan como fuente de electrones compuestos o grupos de un átomo de carbono como el metanol, o los de la trimetilamina, y del dimetilsulfuro [4].

- *Bacterias hidrogenotróficas*: Son las que producen metano a partir de la reducción de hidrógeno y dióxido de carbono. A este grupo pertenecen las bacterias del género *methanococcus*. Como fuente de energía para su crecimiento utilizan el H<sub>2</sub> para el aporte de electrones.

Las rutas metabólicas de producción de metano son: *metanogénesis acetotrófica*, *metanogénesis hidrogenotrófica* y la menos conocida llamada *metanogénesis metilotrófica*.

En la actualidad, sólo se conocen dos géneros de bacterias que realicen la metanogénesis acetotrófica, (es decir, que tengan la capacidad de romper el acetato): *Methanosarcina* y *Methanosaeta*. Asimismo, el género *Methanosarcina* incluye las especies *Methanosarcina barkeri*, *M. mazei* y *M. thermophila* [5]. Las *Methanosarcinas* son el único metanógeno anaerobio conocido e investigado capaz de producir metano usando las tres rutas metanogénicas.

Estudios realizados con digestores anaerobios agroindustriales (purines como aditivo) y reactores de EDAR, han encontrado a las bacterias *Methanosarcinas* como dominantes en los digestores agroalimentarios y a las bacterias *Methanosaetas* en los digestores de las EDAR. Este efecto ha sido atribuido a la mayor concentración de amoníaco en los purines, ya que las elevadas cantidades de amoníaco restringen el crecimiento de las *Methanosaetas* a favor de las *Methanosarcinas* [6].

Los factores de mayor importancia en el desarrollo de las bacterias *Methanosarcinas* son: la temperatura y las condiciones del medio, además de cualquier sustancia o circunstancia capaz de estimular su proliferación.

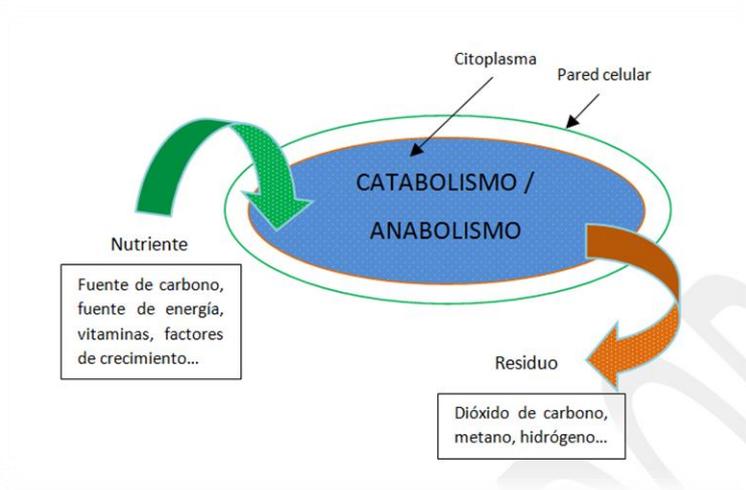
El género *Methanosarcina* se caracteriza por realizar una degradación rápida, pero encuentra limitaciones para utilizar el acetato cuando éste está presente en

bajas concentraciones (< 20 mg/L), mientras que las bacterias del género *Methanosaeta*, presentes en la ruta acetotrófica del proceso, aunque provocan una degradación lenta, encuentran el límite inferior de acetato a menores concentraciones (<4 mg/L) [7].

La temperatura óptima de crecimiento de las bacterias metanogénicas se encuentra en el rango mesofílico (35-37°C) y termofílico (49-57°C), y en particular, el género de la *Methanosarcina* encuentra su rango de crecimiento óptimo entre 30-40°C y 50-55°C [8].

### 3.3.- Necesidades metabólicas de las bacterias del género *Methanosarcina*.

Las bacterias metanogénicas constituyen el último eslabón de la cadena de microorganismos encargados de digerir la materia orgánica y devolver al medio los elementos básicos para reiniciar el ciclo. Durante el proceso metabólico, los microorganismos utilizan los aditivos para generar la energía que necesitan, formando nuevas células y generando productos de descomposición (ácidos grasos, hidrógeno, metano, etc.) (Figura 3.2.). La fuente de energía utilizada por los microorganismos productores de biogás son varios compuestos químicos presentes en el ambiente. Éstos pueden ser compuestos inorgánicos como el hidrógeno, o diferentes tipos de compuestos orgánicos como azúcares, grasas, proteínas y micronutrientes.



**Figura 3.2.-** Esquema del metabolismo de las células. *Adaptado de [7].*

Cuando un aditivo es degradado en las células bacterianas, se obtiene energía de los electrones que se liberan de los enlaces rotos de los aditivos, y ésta es almacenada en la molécula de ATP (adenosín trifosfato).

Varias especies químicas pueden ser usadas por las bacterias como compuestos finales aceptores de electrones, como son, en función de su mayor generación de energía,  $Fe^{3+} > Mn^{4+} > NO_3^- > SO_4^{2-} > CO_2$ . Cada especie de bacteria metanogénica cuenta con sus propios grupos específicos de aditivos para ser degradados (Tabla 3.1). En el caso específico de las *Methanosarcinas*, utilizan en mayor medida acetato,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $CH_3OH$  y metilamina.

**Tabla 3.1.-** Especies de bacterias metanogénicas y sus aditivos [8].

<b>Especie de bacteria</b>	<b>Aditivos</b>
Methanobacterium formicium	$CO_2$ , formiato, $H_2$
Methanobacterium thermoautotrophicum	$H_2$ , $CO_2$ , CO
Methanococcus frisius	$H_2$ , $CH_3OH$ , metilamina
Methanococcus mazei	Acetato, $CH_3OH$ , metilamina
Methanosarcina bakeri	Acetato, $CO_2$ , $H_2$ , $CH_3OH$ , metilamina

El proceso metabólico de las bacterias no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno, sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio: sales minerales, azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, wolframio, níquel, etc. Normalmente, los lodos municipales llevan estos elementos, aunque la proporción disponible puede no ser adecuada y diferir dependiendo de la EDAR considerada.

### 3.3.1.- Macro y micronutrientes.

Las bacterias metanogénicas requieren el aporte de grandes cantidades de macronutrientes, carbono, nitrógeno y fósforo, y micronutrientes en menores cantidades, por ejemplo: Co, Ni y Fe. Los nutrientes inorgánicos son

indispensables en la conversión de acetato a metano, siendo esta etapa limitante del proceso de digestión anaerobia [6].

De los tres macronutrientes anteriormente mencionados, el nitrógeno suele encontrarse en forma de nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ) y el fósforo como ortofosfato ( $\text{P-PO}_4^{3-}$ ), ambos en estado soluble.

La cantidad de carbono, nitrógeno y fósforo que debe de estar disponible en el digestor se puede determinar a partir de la DQO del lodo. La relación aconsejable de macronutrientes es C: N: P / 400: 7: 1 [9].

Cuando las necesidades de macronutrientes no son cubiertas por el lodo de alimentación, bien porque el aditivo es deficitario, o porque los mismos no están disponibles debido a su precipitación, reacción con otros compuestos, etc., es posible la adición de compuestos químicos sintéticos. En el caso de la adición de nitrógeno, los compuestos más adecuados son cloruro de amonio, amoniaco acuoso y urea, mientras que, para añadir fósforo, pueden emplearse sales de fosfato y ácido fosfórico.

Por otra parte, los micronutrientes son tan importantes como los macronutrientes, no sólo porque forman parte de las propias células, sino porque además son necesarios en la actividad enzimática de las bacterias. En el caso particular de las bacterias metanogénicas, éstas los utilizan para convertir acetato en metano. Los micronutrientes involucrados en la acción enzimática son básicamente cobalto, hierro, níquel, zinc y azufre, además de otros elementos como molibdeno, wolframio, selenio, bario, calcio, magnesio, manganeso y cobre, antes citados. Las deficiencias de micronutrientes en los digestores a menudo se confunden con problemas de toxicidad y son, por tanto, difíciles de detectar. Algunas de las necesidades nutricionales de los digestores anaerobios se muestran en la Tabla 3.2 siguiente [8, 9].

**Tabla 3.2.-** Requisitos nutricionales de los digestores anaerobios [8].

<b>Nutrientes</b>	<b>Cantidad mínima recomendada [% de DQO]</b>
Cobalto	0,01
Hierro	0,2
Níquel	0,001
Nitrógeno	3-4
Fósforo	0,5-1
Sulfuro	0,2

La adición de micronutrientes en digestores de EDAR no es una práctica común debido a que los lodos primarios y secundarios normalmente presentan suficientes cantidades de micronutrientes para un correcto funcionamiento del proceso. Sin embargo, si la adición de micronutrientes al digestor es necesaria debido a la ausencia de los mismos o, como sucede en nuestro caso, con motivo de fomentar el crecimiento de las bacterias *Methanosarcinas*, se pueden añadir también levaduras, las cuales contienen numerosos aminoácidos, minerales y vitaminas. La adición de 1,5 kg/m<sup>3</sup><sub>alim.</sub> de levadura debería ser suficiente para el correcto funcionamiento del digestor [8]. Otros elementos favorables al proceso de digestión son el calcio (100-200 mg/L), magnesio (75-150 mg/L), potasio (200-400 mg/L) y sodio (100-200 mg/L), aunque su exceso podría provocar efectos inhibitorios en concentraciones >8000 mg/L para el Ca y Na, >3000 mg/L para el Mg, y >12000 mg/L para el K [10].

Numerosos trabajos han investigado la evolución de la digestión anaerobia en función de los nutrientes presentes en el medio, tanto aquellos intrínsecos a los lodos, como los contenidos en las disoluciones sintéticas preparadas y añadidas al proceso. En la mayoría de los casos consultados, la presencia de los micronutrientes esenciales incrementa el rendimiento en producción de biogás, y además contribuye a estabilizar el proceso de digestión anaerobia en aquellos casos donde posibles elementos inhibitorios, como es el caso del amonio, están presentes en elevadas concentraciones [11].

Noyola y Tinajero (2005) estudiaron la adición de compuestos comerciales (lío-filizados bacterianos y enzimas) y micronutrientes (Fe, Co, Ni y Mo) a lodos procedentes de la etapa primaria de depuración en una EDAR (tratamiento de coagulación-floculación). La digestión fue realizada a 55°C y los experimentos se llevaron a cabo con diferentes concentraciones de micronutrientes (o macronutrientes, según el caso) y aditivos, con el fin de determinar la combinación óptima. Los resultados obtenidos mostraron que el uso de la mezcla de aditivos biológicos y micronutrientes, considerada óptima entre las diferentes combinaciones estudiadas, (Fe: 4,5 mg/g<sub>sv</sub>, Ni: 0,75 mg/g<sub>sv</sub>, Co: 0,45 mg/g<sub>sv</sub>, Mo: 0,09 mg/g<sub>sv</sub> y aditivo biológico: 12 mg/g<sub>sv</sub>) tenía un efecto positivo en la digestión anaeróbica termofílica, incrementándose así el porcentaje de eliminación de sólidos volátiles y mejorando la generación de biogás [12].

En otro estudio realizado con lodo de depuradora municipal en los rangos termofílico y mesofílico, se adicionó, además de los micronutrientes Ni, Co y Fe (25 mg/L en total) propionato de calcio, o acetato de calcio, en concentraciones de 3 g/L y 7,5 g/L, respectivamente. Se encontraron resultados positivos en cuanto a la producción de biogás, y especialmente en el rango termofílico, ya que ésta fue incrementada entre 4 - 51%, comparada con un incremento de 7 - 36% en condiciones mesofílicas. Este mismo estudio mostró un mayor uso de propionato, en comparación con acetato, por parte de los bloques metanogénicos, con la adición de nutrientes [13].

Las necesidades de Ni de las bacterias metanogénicas han sido ampliamente estudiadas en la bibliografía [14-17], ya que el Ni es un micronutriente necesario para las bacterias formadoras de metano, constituyente de la co-enzima F<sub>430</sub> responsable de catalizar la formación de metano. Ello ocurre tanto en las bacterias metanogénicas acetoclásticas como en las hidrogenoclásticas [18, 19]. La adición de Ni puede incrementar la utilización de acetato por las bacterias, mientras que la ausencia, o baja presencia, da como resultado un significativo descenso en la generación de metano. Sin embargo, un uso excesivo de Ni en lodos de depuradora municipales causa inhibición en la fase de metanogénesis, a concentraciones superiores a 1 g/m<sup>3</sup> [16]. Otros estudios realizados en lodos

industriales deficitarios en micronutrientes, han obtenido valores óptimos de Ni entre 12 mg/m<sup>3</sup> y 5 g/m<sup>3</sup> [20].

El Fe es un micronutriente importante en el crecimiento de las bacterias metanogénicas, y concretamente es conocida su necesaria presencia para la bacteria *Methanosarcina* spp [9] durante la fermentación anaerobia de lodos, principalmente debido a su gran capacidad reductora [21]. Según la bibliografía consultada, concentraciones de hierro entre 0,28 - 50,4 g/m<sup>3</sup> son esenciales para que en el proceso se obtenga un alto rendimiento de producción de biogás [9]. Generalmente, en los lodos de EDAR es habitual la presencia de trazas de Fe debido a su utilización en los pasos previos de depuración como coagulante-floculante.

Se ha realizado un reducido número de estudios encaminados a tratar la influencia de Se y W en el proceso de metanogénesis. Feng *et al* (2010) [22] utilizaron residuos de comida industriales para investigar los efectos de mezclas combinadas de Co, Ni, Mo, B, Se y W en la producción de biogás. Los resultados mostraron un incremento en la producción de metano, relacionada con la adición de Se, W y Co. Sin embargo, dicho incremento en la producción de biogás no se ha atribuido a ningún grupo de bacterias *Archaea*, por lo que no se ha demostrado la estimulación de las bacterias acetoclásticas con la adición de selenio y wolframio.

Las levaduras son hongos microscópicos unicelulares cuya importancia radica en su capacidad para realizar la descomposición mediante fermentación de diversas sustancias orgánicas produciendo distintos componentes. Escalante *et al* [23] trataron 30 litros de lodo primario en digestores y a temperatura ambiente. El estudio evaluó el efecto de la adición de tres concentraciones de extracto de levadura: 0,05%; 0,10%; 0,15%. Los resultados obtenidos mostraron buenas eficiencias de eliminación de carga orgánica y sólidos a concentraciones de levadura en estos rangos, siendo la concentración de 0,05% la que aportó el mayor rendimiento de biogás (incremento del 40% con respecto a la digestión sin levadura).

La adición de enzimas al proceso también se ha estudiado con el fin de acelerar la digestión, principalmente en aquellos procesos donde se utilizan materiales lignocelulósicos como aditivos, ofertando algunas compañías productos a base de enzimas que incrementen el rendimiento de producción de biogás en un 10% [24].

Las bacterias metanogénicas acetoclásticas responsables de la generación del 70% del metano a partir de acetato, también utilizan, aunque en menor proporción, compuestos orgánicos como el metanol, las metilaminas y el ácido fórmico [25]. Estudios realizados con *Methanosarcina* Strain 227 aislada de un medio de cultivo rico en acetato procedente de un digestor anaerobio municipal en rango mesofílico, han encontrado mayor crecimiento de las bacterias *Methanosarcinas* en un medio rico en metanol en comparación con otro rico en acetato. El medio utilizado para el estudio consistía en una mezcla de 0,1% NH<sub>4</sub>Cl; 5% solución mineral; 0,5% solución vitamínica; 0,0001% resazurin; 0,05% cysteína-HCl; 0,15% NaHCO<sub>3</sub>; y bien 1% v/v metanol o 0,1 - 0,2M de acetato sódico (en caso de usar el medio acético), junto con extracto de levadura en proporción 0,2 - 1%. Los mayores rendimientos de metano se obtuvieron con la dosis más alta de levadura y en un medio rico en metanol [26].

Incrementos en la actividad metanogénica tras la adición de micronutrientes cuando el medio utilizado es metanol y en presencia de cobalto (5μM) han sido también observados en lodos procedentes de destilerías. En este caso, la concentración de metanol fue de 4 g<sub>DQO</sub>/L y la producción de biogás se incrementó desde 306 mg<sub>CH<sub>4</sub></sub>/g<sub>SSV</sub>·día hasta 535 mg<sub>CH<sub>4</sub></sub>/g<sub>SSV</sub>·día [27]. Concentraciones de 24 mM de metanol podrían ser tóxicas para las bacterias *Methanosarcinas* sp. Strain TM-1 [28].

En la Tabla 3.3 siguiente se muestra resumida información de diferentes estudios realizados sobre adición de aditivos en digestores anaerobios. En todos ellos se observa, independientemente de las concentraciones adicionadas, las cuales dependerán de cada aditivo en particular, la adición de Fe, Ni y Co como elementos comunes, así como la mejora en la producción de biogás del proceso, con el uso de los mismos.

**Tabla 3.3.-** Resumen de estudios realizados en digestores anaerobios. Investigación de la presencia y/o adición de aditivos.

Aditivos	Condiciones de operación	Conclusiones	Ref.
<b>Fe: 4,5 mg/g<sub>SV</sub></b> <b>Ni: 0,75 mg/g<sub>SV</sub></b> <b>Co: 0,45 mg/g<sub>SV</sub></b> <b>Mo: 0,09 mg/g<sub>SV</sub></b> <b>Aditivo bacilli: 12 mg/g<sub>SV</sub></b>	Lodo digerido de tratamiento primario EDAR. SV: 32,7 g/L; AGV: 1750 mg/L. Lodos primarios de EDAR. Lodo primario/Lodo digerido: 0,1 mg/mg. Capacidad digestores: 120 ml. Operación en discontinuo. Rango termofílico.	El aumento en la dosis de <i>bacilli</i> y metales incrementa la producción de metano y la eficiencia de eliminación de SV. Los rendimientos de producción de metano superan el 100% con respecto a lodo sin adición de aditivos. El coste de añadir los aditivos es de 0,20 \$/kg <sub>SV</sub> .	[12]
<b>Extracto de levadura: 0,05 y 0,15 % w/v</b>	Lodo digerido de lodo residual primario. Lodos residuales primarios de EDAR. Carga orgánica: 2 kg/ m <sup>3</sup> .día Capacidad digestores: 30 L Operación en semicontinuo (alimentación una vez al día) Temperatura operación media: 25,6 °C.	Se aprecia un ligero incremento en la producción de biogás.	[29]

**Tabla 3.3.- (Cont.)** Resumen de estudios realizados en digestores anaerobios. Investigación de la presencia y/o adición de aditivos.

<p>I) Propionato de calcio: 3 g/L; (NiCl<sub>2</sub>, CoCl<sub>2</sub>, FeCl<sub>3</sub>): 25 mg/L) II) Acetato de calcio: 7,5 g/L; (NiCl<sub>2</sub>, CoCl<sub>2</sub>, FeCl<sub>3</sub>): 25 mg/L) Experimentos realizados con opción I y II, y con la adición de Ni, Co y Fe por separado y en combinación.</p>	<p>Lodo digerido EDAR. Lodo sin digerir EDAR. Capacidad digestores: 160 ml. Rango termofílico y mesofílico.</p>		<p>La adición de Ni, Co y Fe incrementa la utilización de propionato y acetato (incrementos del 50 y 35% respectivamente). La producción de metano se incrementa desde 14% a 50% con la utilización de propionato. BMP (media de todas las EDAR) varían desde 0,52 L CH<sub>4</sub>/L<sub>lodo</sub> hasta 1,06 L CH<sub>4</sub>/L<sub>lodo</sub> en rango mesofílico, y de 0,79 a 3,77 v/v para termofílico.</p>	<p>[13]</p>
<p>Ni(NiCl<sub>2</sub>): 100 nM Co (CoCl<sub>2</sub>): 50 nM Mo (Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>): 50 nM</p>	<p>Base de la reacción: N.D. Adición de ácido acético como mezcla equimolecular de acetato de sodio, de potasio, de amonio y ácido acético glacial: 67 mM inicial. Mantenimiento de concentración de ácidos volátiles en 300 mg/L. Aditivo: Residuos de comida. Digestor: reactor de lecho fijo. Volumen del reactor: 35 L.</p>		<p>La adición de micronutrientes por separado produce menor conversión de ácido acético a CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> que cuando se realiza una mezcla combinada de los elementos. El rendimiento de metano se incrementó en un 42%, pasando la producción diaria de 115,6 L a 165,2 L después de 17 días de la adición de Ni, Co y Mo.</p>	<p>[18]</p>

**Tabla 3.3.- (Cont.)** Resumen de estudios realizados en digestores anaerobios. Investigación de la presencia y/o adición de aditivos.

<p><b>KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>: 3,4g; K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>: 3,4g;</b>  <b>NH<sub>4</sub>Cl: 2,13g; Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>: 2,54g.</b>  <b>MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O: 41 mg/L;</b>  <b>MnCl<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O: 5mg/L;</b>  <b>FeCl<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O:5 mg/L;</b>  <b>NiCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O:1,2mg/L;</b>  <b>ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O: 1 mg/L;</b>  <b>CoCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O: 1mg/L;</b>  <b>CaCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O:4mg/L; Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>:0,8</b>  <b>mg/l; Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O: 0,2mg/L;</b>  <b>CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O: 0,1mg/L.</b></p>	<p>Base de la reacción: bacterias aclimatadas de sedimentos de lagunas.            Aditivo: disolución de micronutrientes            Recirculación de H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> desde la cabeza del fermentador al medio de cultivo.            Operación en discontinuo.</p>	<p>Las concentraciones de 1,32 g/L, 1,13 g/L, 0,12 g/L, 4,8 g/L y 30 g/L para Fe, Zn, Cu, Ni y Co, respectivamente, fueron bajas para el crecimiento bacteriano de manera que deben incrementarse para obtener mayores rendimientos de biogás.</p>	<p>[30]</p>
<p><b>NiCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O: 0,28-0,88 mg/kg<sub>alim.</sub></b>  <b>CoCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O: 0,02-0,19 mg/kg<sub>alim.</sub></b>  <b>FeCl<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O: 7,5 μM</b>  <b>ZnCl<sub>2</sub>: 0,5 μM</b>  <b>MnCl<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O: 0,5 μM</b>  <b>H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>: 0,1 μM</b>  <b>CuCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O: 0,01 μM</b>  <b>Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>.5H<sub>2</sub>O: 1,0 μM</b></p>	<p>Lodo de planta de fermentación de maíz.            Aditivo: residuo maíz.            Volumen reactor: 5l.            Ratio C:N:P de 125:5:1            Rango mesofílico.            Operación en semicontinuo.</p>	<p>Limitaciones en el proceso (bajo pH, baja actividad bacterias metanogénicas) en concentración de Ni y Co por debajo 0,1mg/kg<sub>alim.</sub> y 0,02 mg/kg<sub>alim.</sub>            Fermentación estable con niveles de Ni y Co aproximados de 0,6 y 0,05 mg/kg. No incrementa la producción de biogás.</p>	<p>[31]</p>
<p><b>Fe: 50μM</b>  <b>Co, Ni, Cu, Zn, Mn, Mo, Se, W: 5</b>  <b>μM/cada uno</b></p>	<p>Lodo de destilería (planta de Nedalco).            Aditivo: metanol (4 g<sub>DQO</sub>/L) o Acetato (2 g<sub>DQO</sub>/L).</p>	<p>Resultado BMP: experimento planta Nedalco: No adición metales: 306 mg<sub>CH<sub>4</sub></sub>/g<sub>SSV</sub>·día Todos: 344 mg<sub>CH<sub>4</sub></sub>/g<sub>SSV</sub>·día Metales+5μM Co: 730 mg<sub>CH<sub>4</sub></sub>/g<sub>SSV</sub>·día No metales+5μM Co:535 mg<sub>CH<sub>4</sub></sub>/g<sub>SSV</sub>·día</p>	<p>[27]</p>

### 3.3.2.- Levaduras.

Las levaduras son microorganismos unicelulares pertenecientes al reino de los hongos. Estos microorganismos tienen un papel fundamental en los procesos fermentativos, y comprenden un variado abanico de microorganismos “*especializados*” en panificación, vinificación, nutrición, usos farmacéuticos, usos cerveceros y destilería, entre otros.

En este caso, la especie utilizada, nombrada de forma genérica, es la levadura de cerveza, cuyo nombre científico, *Saccharomyces cerevisiae*, indica que se trata de un hongo que fermenta el azúcar de los cereales (*saccharo-mucus cerevisiae*) para producir alcohol y dióxido de carbono [32].

Según el contenido de humedad final, esta levadura se presenta como:

- **Levadura fresca:** Contiene un 70% de humedad y un 30% de sólidos aproximadamente. Su vida útil es de dos semanas y debe almacenarse refrigerada. Este producto es el que prefiere la industria de panadería.
- **Levadura seca:** Contiene aproximadamente el 10% de humedad y, en efecto, un 90% de sólidos. Tiene una vida útil de 6 meses y no es imprescindible refrigerarla. Requiere hidratación para su uso.
- **Levadura instantánea:** Contiene un 5% de humedad. Su vida útil, envasada al vacío puede llegar a ser de 2 años. No requiere refrigeración para su mantenimiento, ni rehidratación previa para su uso.
- **Levadura líquida:** Hasta el año 1825, cuando la levadura prensada fue introducida por Tebbenhof, la levadura se vendía en forma líquida. El retorno a esta forma de presentación ha sido respuesta de los fabricantes a los pedidos de las panificadoras industriales.

A lo largo de los años, diversos autores han demostrado que uno de los estimulantes de crecimiento más efectivos para mejorar la digestión anaerobia es la levadura puesto que aporta diversos metales y vitaminas que actúan como elementos traza y como factores estimulantes de crecimiento, ya que todos ellos forman parte constitutiva de enzimas y coenzimas específicas de las bacterias metanogénicas [29].

### 3.3.3.- Metanol.

El metanol es un compuesto químico básico utilizado en la fabricación de muchos productos que afectan a nuestro entorno: pinturas, plásticos, muebles y alfombras, piezas de automóviles y líquidos limpiadores. El metanol también está siendo una fuente de energía emergente para el funcionamiento de coches, camiones, autobuses, e incluso turbinas de energía eléctrica. El metanol, también conocido como alcohol metílico o alcohol de madera, es el más simple de todos los alcoholes.

El metanol es un líquido incoloro, ligero, inflamable a temperatura ambiente, y que contiene menos proporción de carbono - hidrógeno que cualquier otro combustible líquido. Es una sustancia estable y biodegradable, y tiene numerosas aplicaciones industriales y comerciales.

El metanol se produce de forma natural en diversos hábitats y se descompone rápidamente, tanto en condiciones aeróbicas, como anaeróbicas.

La industria del metanol se extiende por todo el mundo con más de 90 plantas de metanol, y con una capacidad de producción total de más de 75 millones de toneladas métricas (casi 90.000 millones de litros, 24.000 millones de galones). Cada día se utilizan más de 100.000 toneladas de metanol como materia prima química o como combustible para el transporte (125 millones de litros, 33 millones de galones). La industria global del metanol genera cada año 36.000 millones de dólares de EE.UU. en actividad económica, y sostiene más de 100.000 puestos de trabajo en todo el mundo [33].

Como se ha mencionado en páginas anteriores, los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaerobia mediante la formación de metano a partir de aditivos monocarbonados, o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato,  $H_2/CO_2$ , formiato, metanol y algunas metilaminas. Los organismos metanogénicos se incluyen dentro del grupo *Archae* y tienen entre sí características comunes, a su vez, que los diferencian del resto de procariontes [34].

#### 3.3.4.- Residuos.

Según la Ley 22/2011, de 28 de Julio, de Residuos y Suelos Contaminados, residuo es cualquier sustancia, u objeto, que su poseedor deseche, o tenga la intención, u obligación, de desechar.

Por ello, en la mencionada Ley aparece, asimismo, el término de gestión de residuos, es decir, recogida, transporte y tratamiento de residuos, incluida la vigilancia de estas operaciones, así como el mantenimiento posterior al cierre de los vertederos.

En la actualidad, la política de gestión de residuos busca minimizar el impacto ambiental y hallar una solución lo más respetuosa con el Medio Ambiente, por lo que se seguirá un sistema escalonado para el tratamiento de los mismos. La pirámide de gestión de Residuos de la Figura 3.3 nos indica la secuencia de acción del tratamiento.

En el proceso de gestión de residuos, en un principio, la actividad se centra en la prevención (evitar la producción de desechos). La segunda fase del proceso consistirá en la minimización, o reducción, del volumen inicial.

La reutilización es el proceso en donde se vuelve a dar uso a los productos tras una restauración, y el reciclaje, consiste en utilizar partes o elementos que todavía pueden ser usados.



**Figura 3.3.-** Pirámide de gestión de residuos. Adaptación de [35].

La valorización energética es una alternativa real para optimizar la gestión de los residuos. Además, el interés por convertir dichos materiales en fuente de energía renovable ha aumentado notablemente en los últimos años dadas sus buenas perspectivas de futuro.

Existe una gran variedad de técnicas de valorización energética que son aplicables en función del tipo de residuo, o subproducto, a valorizar. Se clasifican en: métodos termoquímicos (combustión, pirólisis y gasificación), químicos (producción de biodiesel), y métodos bioquímicos (producción de bioetanol mediante fermentación alcohólica, y producción de biogás a través de la fermentación, o digestión anaerobia).

Los métodos termoquímicos suelen requerir aditivos de poca humedad, lo cual restringe su uso en muchas ocasiones, como en el caso de los subproductos de

la industria agroalimentaria que suelen presentar un elevado contenido en agua. La producción de biodiesel exige un tipo de residuos muy concreto, con alto contenido en grasas y cierto grado de pureza. Para producir bioetanol también se precisa un tipo particular de residuos (elevado contenido en hidratos de carbono, almidón, etc.) y también con bajo contenido en impurezas.

A diferencia de las alternativas mencionadas anteriormente, la producción de biogás de origen agroalimentario o agroindustrial admite residuos de elevada humedad y de muy distinta composición y procedencia, para tratarlos mediante digestión o fermentación anaeróbica. Durante dicho proceso, el cual se desarrolla en ausencia de oxígeno, la materia orgánica biodegradable se descompone por acción de diferentes grupos de microorganismos, desde sus formas más complejas (carbohidratos, proteínas, lípidos, etc.), hasta otras formas más sencillas, generándose así el biogás [36].

Por ello, la alternativa actual más eficaz, técnica y económica, de gestión de residuos es añadirlos a concentraciones controladas y estudiadas previamente en digestores anaerobios aprovechando una doble función: gestión eficaz de los residuos y aumento de producción de biogás.

#### 3.3.5.- Lixiviados.

Los vertederos de residuos sólidos urbanos llevan asociado un inconveniente, la gestión de los lixiviados producidos, que deben ser tratados de la mejor manera ambiental y económica, por degradación de la materia orgánica presente.

Los lixiviados son resultado de la transformación de la materia orgánica de los residuos sólidos urbanos, al percolar en forma líquida a través de ellos, generalmente de aspecto color oscuro. Durante este proceso se arrastran partículas y se disuelven sustancias que están contenidas en los residuos. La composición de los mismos varía mucho de acuerdo con el tipo de residuos, las precipitaciones en el área, las velocidades de descomposición química, edad del

vertedero y otras condiciones del lugar, pero todos coinciden en poseer una alta carga orgánica.

Son de naturaleza anóxica y ácida, ricos en ácidos orgánicos, y suelen contener altas concentraciones de iones metálicos.

Su olor es penetrante. Su peligrosidad se debe a las altas concentraciones de contaminantes orgánicos y nitrógeno amoniacal, así como a sustancias tóxicas que pueden estar presentes y, si no se controlan adecuadamente, pueden contaminar los suelos y las aguas superficiales y subterráneas.

El adecuado tratamiento de estos líquidos tóxicos debe ser parte fundamental de la gestión de los vertederos de residuos. La tecnología empleada para el tratamiento estará condicionada en cada caso por aspectos técnico-económicos [37].

Según Inspección Ambiental de la Consejería de Medio Ambiente de la Región de Murcia, la Mejor Técnica Disponible (MTD) para gestionar los lixiviados es su tratamiento en una EDAR, ya que puede cumplir dos objetivos a la vez: en primer lugar, una gestión eficiente, tanto desde el aspecto técnico como del económico y, en segundo lugar, porque puede ser útil en cuanto a producción de biogás ya que puede ser usado (dependiendo del tipo de lixiviado) como aditivo para las bacterias productoras.

#### 3.3.6.- Lodos.

El lodo, o lodo de EDAR, es un complejo heterogéneo de microorganismos, aceites, materia fecal, elementos orgánicos no digeridos, etc... La materia orgánica presente, y sin digerir, contiene una mezcla de moléculas que pueden ser proteínas, lípidos, polisacáridos, derivados fenólicos, hidrocarburos aromáticos, entre otros.

### 3.3.6.1.- Lodos mixtos.

Los lodos o fango mixtos son una mezcla de lodos primarios y secundarios. De manera general, la producción por habitante equivalente tratado es entre 30-45 g. En la Tabla 3.4 se exponen las magnitudes que, habitualmente, definen el lodo mixto de una EDAR y sus rangos. Los datos son obtenidos de las distintas EDAR analizada en esta tesis.

**Tabla 3.4.-** Magnitudes comunes y habituales de un lodo mixto.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
pH	6
Conductividad eléctrica (mS/cm)	3,23
Sólidos totales (%)	3,8
Sólidos volátiles (%)	2,5
Nitrógeno amoniacal (g/L)	0,11
Nitrógeno total (g/L)	1,3

### 3.3.6.2.- Lodos digeridos<sup>1</sup>.

El lodo digerido por vía anaerobia es de color marrón oscuro y contiene una cantidad grande de gas. Cuando está totalmente digerido, no es molesto su olor, siendo éste débil. En la fase experimental de esta tesis, el lodo digerido es el que actúa como base de la reacción, es decir, es el lodo que aporta las bacterias al proceso, mientras el lodo mixto y/o aditivos son los que aportan la materia orgánica al mismo. La Tabla 3.5, siguiente, muestra los rangos de contenido de los diversos componentes.

**Tabla 3.5.-** Sustancias comunes y habituales en los lodos digeridos. Adaptación de [1].

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Sólidos deshidratados (%)	6-12	Grasas (%)	5-12
Sólidos Volátiles (%)	30-60	Proteínas (%)	32-41
Nitrógeno (%)	1,6-6,0	Alcalinidad (mg/L)	2500-3500
Fósforo (%)	1,5-4,0	Ácidos orgánicos (mg/L)	100-600
Potasio (%)	0,0-3	Contenido energético (MJ/Kg)	9000-13500
Celulosa (%)	8-15	pH	6,5-7,5
Hierro (g/Kg)	3-8		

<sup>1</sup>En el lodo digerido están las bacterias anaerobias que necesitan ser alimentadas con lodo mixto y/o aditivos y es la base para el comienzo de la digestión anaerobia.

### 3.3.7.- Biogás.

El biogás es un gas combustible cuyos principales componentes son metano (CH<sub>4</sub>, entre 50 a 70% vol.), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub> entre 30 a 50% vol.) y otros componentes en menores proporciones. El metano, principal componente del biogás, es el que le confiere su característica como combustible. El valor energético del biogás, por lo tanto, estará determinado por la concentración de metano, y su contenido energético es de 20 a 25 MJ/m<sup>3</sup>, algo más bajo si se compara con el de 33 a 38 MJ/m<sup>3</sup> del gas natural.

El biogás se genera mediante la descomposición microbiana de materia orgánica biodegradable en condiciones anaerobias. Se define como "biogás agroindustrial" aquel biogás generado a partir de aditivos agroindustriales, como las deyecciones ganaderas, lodos de industrias agroalimentarias, y restos de cosechas [39]. En la Tabla 3.6, siguiente, se expone los contenidos del biogás procedente de la digestión de distintos tipos de materiales.

**Tabla 3.6.-** Componentes del biogás según el aditivo utilizado. Adaptación de [40].

<b>Componente</b>	<b>Residuos Agrícolas</b>	<b>Lodos de Depuradora</b>	<b>Residuos Industriales</b>	<b>Gas de Vertedero</b>
CH <sub>4</sub>	50-80%	50-80%	50-70%	46-65%
CO <sub>2</sub>	30-50%	20-50%	30-50%	34-55%
H <sub>2</sub> O	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
H <sub>2</sub>	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%
H <sub>2</sub> S	100-700 ppm	0-1%	0-8%	0,5-100ppm
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
CO	0-1%	0-1%	0-1%	Trazas
N <sub>2</sub>	0-1%	0-3%	0-1%	0-20%
O <sub>2</sub>	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%
C. orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	5ppm

“No podemos enseñar nada a nadie. Tan sólo podemos ayudar a que descubran por sí mismos”. **Galileo Galilei.**

## 4.- Materiales y métodos.

### 4.1.- Materiales.

#### 4.1.1.- En el estudio del potencial de biometanización en discontinuo.

Los ensayos se han realizado utilizando el equipo *Automatic Methane Potential Test System* (AMPTS), suministrado por la firma Bioprocess Control, Figura 4.1.

Se compone de lo siguiente:

- Baño termostático.
- 15 reactores de 0,5 litros con agitación mecánica.
- 15 reactores para la absorción de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S en disolución de NaOH 3M.
- Dispositivos de medida del volumen en continuo del gas generado.
- Unidad de adquisición de datos.



**Figura 4.1.-** Equipo AMPTS (Bioprocess Control) para la medida del potencial de biometanización en discontinuo.

También se ha usado un analizador termogravimétrico (LECO 701) (Figura 4.2). Mide el contenido de cenizas, materia volátil y humedad de muestras orgánicas, inorgánicas y sintéticas, en estado sólido o líquido. Se trata de un horno cuyo rango de temperaturas oscila entre 50 y 1000°C. La medición se basa en la pesada de las muestras mediante una balanza incorporada en el propio equipo. Lleva un ordenador anexo al equipo para el control de los análisis y la toma de datos.



**Figura 4.2.-** Equipo Termogravimétrico para la medida de humedad, sólidos volátiles, carbono fijo y cenizas.

Para la medida de los ácidos grasos y volátiles, nitrógeno, DQO (Demanda Química de Oxígeno) se han usado kits de reacción cuya medición se hace con espectrofotómetro. El pH y la conductividad se han analizado gracias a un multímetro convencional.

#### 4.1.2.- En el estudio del proceso de digestión anaerobia en semicontinuo.

Los ensayos se han realizado utilizando dos bancos de digestión anaerobia similares, de vidrio SALHER, compuestos cada uno por un digester anaerobio, un contador de biogás, una bolsa de recogida del mismo y un medidor de composición del biogás generado (Figura 4.3).

Cada digester consta de los siguientes elementos:

- Digester encamisado de 15 litros en vidrio con agitación mecánica de velocidad regulable.

- Baño termostático con sonda de Pt 100 para el mantenimiento de la temperatura en el digestor.
- Bomba peristáltica de velocidad regulable para la alimentación y descarga del digestor.
- Trampa para la eliminación de la humedad del biogás generado.
- Tapa metálica acoplada al cuerpo del reactor mediante un cierre de tipo “aro de ballesta”. Dicho cierre permite el sellado del reactor y el mantenimiento de las condiciones anaerobias. Las aberturas de la tapa se distribuyen en:
  - 1 abertura de entrada/descarga de muestra, acoplada a un conducto interno que alcanza la base del reactor, y conectada a la bomba peristáltica.
  - 1 abertura para la sonda de Pt 100 para medir la temperatura.
  - 1 abertura de salida de biogás.
  - 1 abertura de entrada de materiales sólidos.

Los contadores de biogás (Ritter MGC-1) están especialmente diseñados para medirlo de forma directa, en medios inertes, o medianamente corrosivos. Para determinar el volumen de biogás producido se conecta la salida de gas del reactor a la entrada de gas del equipo (previa captura de la humedad contenida en el biogás en una trampa diseñada para tal efecto). La lectura se produce de forma continua, obteniendo en todo momento una lectura directa de la producción de biogás. El flujo mínimo de medida es de 1 ml/h (máximo 1 L/h), con una resolución de aproximadamente 3 ml y una precisión de  $\pm 3\%$ .



**Figura 4.3.-** Equipo de co-digestión anaerobia en semicontinuo.

La determinación de la composición del biogás se ha realizado mediante un analizador (Modelo BIOGÁSCHECK), el cual permite hacer mediciones puntuales de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  en el interior del digester mediante absorción de infrarrojos, y de  $\text{H}_2\text{S}$  con célula externa. El rango de lectura es de 0-100% en  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ , y su precisión de  $\pm 0.5\%$  para ambos gases (ver Figura 4.4).



**Figura 4.4.-** Analizador de Biogás.

La bolsa de recogida de biogás tiene una capacidad de 20 litros (Marca *Calibrated Instruments, Inc.*) y es impermeable y opaca (ver Figura 4.3, parte superior). Se conecta a la salida del contador para recoger el gas producido. El analizador de biogás se puede conectar a la bolsa para medir la composición del volumen de gas acumulado.

#### 4.1.3.- Reactivos para la fase experimental.

##### 4.1.3.1.- Lodos de depuradoras urbanas (EDAR A, B y C).

Para la realización de los ensayos se han utilizado lodos mixtos procedentes de tratamientos de aguas residuales urbanas, mezcla del tratamiento primario y secundario, o biológico, y lodos digeridos procedentes de los digestores de tres depuradoras, que denominamos A, B y C.

En los lodos usados para los ensayos (tanto digerido, como mixto), los valores de pH, sólidos totales y sólidos volátiles, son los habituales para estos materiales: el pH entre 6 y 7; los sólidos totales entre 3 y 4% y los sólidos volátiles entre 2 y 3%.

##### 4.1.3.2.- Levadura, metanol y residuos (aditivos).

Se han utilizado como aditivos: levadura, metanol, lixiviado de vertedero de residuos sólidos urbanos, residuos de matadero, residuos ganaderos, residuos vegetales, residuo industrial. Sus caracterizaciones aparecen en las Tablas: 4.5; 4.6; 4.10; 4.11, en donde se exponen las magnitudes de los distintos experimentos programados.

## 4.2.- Métodos.

### 4.2.1.- Ensayos con levadura y metanol.

#### 4.2.1.1- En el estudio del potencial de biometanización en discontinuo.

##### a) Selección de componentes.

Como criterio de elección de componentes, se han tenido en cuenta los siguientes factores:

- 1.- Nutrientes utilizados que actúan como activadores de los metaloenzimas identificadas en la metanogénesis acetoclástica, los cuales se muestran en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1.-** Principales activadores de los metaloenzimas identificadas en la ruta metanogénica acetoclástica [22].

<b>Metaloproteínas/metaloenzimas</b>	<b>Activadores</b>
Codeshidrogenasa/acetil-CoA descarboxilasa	Co, Ni, Fe
Metil-H <sub>4</sub> SPT:HS-CoM metiltransferasa	Co
Metil-CoM reductasa	Ni

Otros elementos, como el Mo, W y Se, son utilizados por las enzimas encargadas de la ruta metanogénica hidrogenotrófica, cuya función es transformar el CO<sub>2</sub> en metano [41]. La adición de estos elementos incrementa la producción de biogás, sin embargo, no es la ruta donde participan las bacterias *Methanosarcinas* [22] y, por tanto, el empleo de estos compuestos únicamente se consideraría de forma puntual en algún caso.

- 2.- Las levaduras comerciales normalmente son una formulación, complementada con trazas minerales, aminoácidos y vitaminas, y algunas de ellas contienen más de 10 micronutrientes. Algunos ejemplos son:

NEUSOL M&B [42], con 16 micronutrientes, entre los que se encuentran calcio, hierro, magnesio, cobalto, cobre y zinc. Además, esta marca en particular incluye 20 aminoácidos, entre ellos, lisina y 13 vitaminas, incluyendo ácido fólico. El contenido de estos nutrientes es bajo, <1% del total del peso de la masa celular. En la Tabla 4.2 se incluyen algunas de las concentraciones de trazas del preparado NEUSOL M&B.

**Tabla 4.2.-** Concentraciones de micronutrientes contenidas en NEUSOL M&B [42].

<b>Micronutrientes</b>	<b>Contenido</b>
Ca	1,9 %
Fe	0,08 %
Mg	0,123 %
Zn	0,0035 %
P	0,1 %

También MICROCAT®-AD es otro aditivo que, a diferencia del anterior, incluye microorganismos y enzimas [43].

El Vita Stim, de AQUAFIX, es otro aditivo que contiene 6 elementos esenciales en su formulación y está destinado principalmente a mantener la actividad en el reactor. El precio de Vita Stim es de aproximadamente 45 €/kg, siendo el compuesto bastante soluble en agua [44].

El aditivo N100 Micronutriente BIO-Energético bacterial, de Bio-Chem, contiene micronutrientes y complementos esenciales para las necesidades metabólicas básicas de las bacterias. Algunos de sus beneficios incluyen la estabilización de las poblaciones biológicas, control de la espuma y bulking, causadas por las condiciones de deficiencia en nutrientes [45].

El extracto de levadura de cerveza [29] es un estimulante de crecimiento, efectivo para la digestión anaerobia, ya que aporta diversos metales y vitaminas. La levadura de cerveza es un suplemento nutricional natural que contiene

vitaminas, minerales y concentraciones de nutrientes como el fósforo, potasio, azufre, magnesio, hierro, selenio, cromo, molibdeno, cobre, zinc y calcio [46]. Se presenta comercialmente en fase líquida, o seca, y suele emplearse como alimentación animal. El precio de la levadura húmeda es de aproximadamente 36€/Tm, mientras que deshidratada asciende a 600 €/Tm [47]. Sus características químicas y nutritivas se muestran en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3.-** Características químico-nutritivas de la levadura de cerveza húmeda [47].

<b>Sobre materia seca</b>	
Materia seca	15,00%
Grasa bruta	1,90%
Fibra bruta	3,00%
Azúcares	7,40%
Proteína Bruta	47,00 %
Lisina	3,60 %
Metionina	0,75 %
MET-CIS	1,30 %
Triptófano	0,59 %
Treonina	2,37 %
Calcio	0,15 %
Fósforo Total	1,50 %
Fósforo Disponible	0,97 %
Proteína Degradable	24,44 %

3.- Adición de compuestos orgánicos como, por ejemplo, acetato o metanol. Las bacterias *Methanosarcina*, tal y como se ha comentado anteriormente, son responsables de la conversión de acetato presente en el medio en metano y dióxido de carbono. El metanol también es

degradado por las *Methanosarcinas*, por lo que podría utilizarse como aditivo del proceso.

El metanol incrementa la producción de biogás, sin embargo, perjudica la conversión del acetato presente en el reactor, ya que cuando las *Methanosarcinas* utilizan el metanol, no comienzan la degradación del acetato hasta la completa eliminación del mismo [27]. Por esta razón, los niveles de metanol no deberían superar ciertos límites, todavía por explorar.

Tras el análisis realizado se han seleccionado 3 tipos de aditivos, cuya adición al proceso de digestión, se estima podría acelerar el metabolismo de las *Methanosarcinas* y, por tanto, la producción de biogás. Los compuestos a utilizar en la fase experimental son:

- Metales: Fe, Ni y Zn (descartado por ser los lodos de EDAR ricos en este tipo de nutrientes).
- Levadura: Levadura de cerveza comercial húmeda o prensada.
- Metanol.

#### b) Experimentos programados.

Tras un estudio preliminar llevado a cabo, esta fase experimental se ha estructurado para la realización de 3 bloques de ensayos de medida del potencial de biometanización en discontinuo, siendo el primero (Bloque 1) exploratorio, y considerado ése como base de planificación para el diseño de los ensayos posteriores: Bloques 2 y 3.

Como el equipo experimental dispone de un número limitado de reactores (15 en total), se han realizado las combinaciones de los aditivos a estudiar solo por duplicado, o de forma única. Con ello, en los Bloques 1 y 2 (sustrayendo la combinación dirigida al blanco) se dispone de 7 combinaciones, siendo una de

ellas realizada sin duplicar. En el Bloque 3, 9 combinaciones con 3 de ellos sin duplicar.

Los ensayos se han diseñado de forma que cada reactor, excepto los asignados a sólo fango digerido, cuenta con la misma proporción de  $L_{dig} / L_{mixt}$ . Los aditivos utilizados se han añadido en diferentes proporciones a la mezcla  $L_{dig} / L_{mixt}$ . La Tabla 4.4 muestra las combinaciones y concentraciones de componentes utilizados en cada bloque de ensayos.

**Tabla 4.4.-** Programación de experimentos de los Bloques de Ensayos 1, 2 y 3<sup>1</sup>.

Combinación	Bloque 1 (EDAR C) <sup>2</sup>	Bloque 2 (EDAR C) <sup>3</sup>	Bloque 3 (EDAR C y B) <sup>4</sup>
L <sub>dig</sub>	L <sub>dig</sub> C	L <sub>dig</sub> C	L <sub>dig</sub> C L <sub>dig</sub> B
Combinación 1	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> (ver Tabla A.1.1)	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub>	L <sub>dig</sub> C+L <sub>mixt</sub> C
Combinación 2	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +3 % (p/v) LEVADURA (ver Tabla A.1.2)	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +1 % (p/v) LEVADURA (ver Tabla A.1.4)	L <sub>dig</sub> B+L <sub>mixt</sub> B (ver Tabla A.1.7)
Combinación 3	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +6 % (p/v) LEVADURA	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +2 % (p/v) LEVADURA (ver Tabla A.1.5)	L <sub>dig</sub> B+L <sub>mixt</sub> B+1% (p/v) LEVADURA (ver Tabla A.1.8)
Combinación 4	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +8 % (p/v) LEVADURA	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +16 g DQO/L <sub>alim.</sub> MeOH (ver Tabla A.1.6)	L <sub>dig</sub> B+L <sub>mixt</sub> B+2% (p/v) LEVADURA (ver Tabla A.1.9)
Combinación 5	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +4 g DQO/L <sub>alim.</sub> MeOH	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +20 g DQO/L <sub>alim.</sub> MeOH	L <sub>dig</sub> B+L <sub>mixt</sub> B+0,5% (p/v) LEVADURA
Combinación 6	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +8 g DQO/L <sub>alim.</sub> MeOH	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +3 % (p/v) LEVADURA+12 g DQO/L <sub>alim.</sub> MeOH	L <sub>dig</sub> B+L <sub>mixt</sub> B+16 g DQO/L <sub>alim.</sub> MeOH B (ver Tabla A.1.10)
Combinación 7	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +12 g DQO/L <sub>alim.</sub> MeOH (ver Tabla A.1.3)	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +1 % (p/v) LEVADURA+12 g DQO/L <sub>alim.</sub> MeOH	L <sub>dig</sub> B+L <sub>mixt</sub> B+12 g DQO/L <sub>alim.</sub> MeOH B (ver Tabla A.1.1)
Combinación 8	-	-	L <sub>dig</sub> C+L <sub>mixt</sub> C+0,5% (p/v) LEVADURA
Combinación 9	-	-	L <sub>dig</sub> C+L <sub>mixt</sub> C+0,1% (p/v) LEVADURA

<sup>1</sup>Se trata de tres bloques de ensayos y con 15 reactores cada bloque.

<sup>2</sup>Todos los lodos usados en el bloque 1 proceden de la EDAR C.

<sup>3</sup>Todos los lodos usados en el bloque 2 proceden de la EDAR C.

<sup>4</sup>En el bloque 3, la combinación L<sub>dig</sub> es mezcla de lodo digerido de las EDAR C y B; la combinación 1, es mezcla de lodo digerido y mixto de la EDAR C, las combinaciones 2, 3, 4, 5, 6, 7 contienen mezcla de lodo digerido y lodo mixto de B con levadura a diferentes concentraciones (ver Tabla 4.4), las combinaciones 8 y 9 contienen mezcla de lodo digerido y lodo mixto de C con levadura a diferentes concentraciones (ver Tabla 4.4).

### C) Características de los componentes.

Los componentes utilizados en los 3 primeros bloques de ensayos (con 15 reactores cada bloque) de medida del potencial de biometanización en discontinuo han sido:

- *Lodo mixto*. Procedente de EDAR. El lodo mixto corresponde al lodo de entrada a los digestores anaerobios, procedente del proceso primario y el biológico de cada EDAR. Los diferentes lodos han sido nombrados como A, B, C.
- *Lodo digerido*. Procedente de EDAR A, B y C.
- *Levadura*. Levadura de cerveza comercial húmeda y prensada de tipo panadería.
- *Metanol* (99.5% pureza). Marca PANREAC.

Todos los componentes han sido caracterizados antes de iniciar los ensayos midiéndoles el pH, sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV). Asimismo, han sido fijadas como condiciones de operación para el proceso, la temperatura de incubación (35°C) y la ambiente (21°C).

Los ensayos se han realizado empleando lodo digerido de las EDAR de la misma procedencia que el lodo mixto.

La siguiente Tabla 4.5 muestra información sobre las características de los distintos componentes usados en los ensayos (son tres bloques de ensayos con 15 experimentos cada uno).

**Tabla 4.5.-** Características de los distintos componentes utilizados en las pruebas de medida del potencial de biometanización en discontinuo con: levadura y metanol.

<b>EDAR C (BLOQUE DE ENSAYOS 1)</b>			
<b>COMPONENTES</b>	<b>pH</b>	<b>ST [% m/m.f.]<sup>1</sup></b>	<b>SV [% m/m.f.]<sup>1</sup></b>
Lodo digerido EDAR	6,93	3,22	2,03
Lodo mixto EDAR	6,97	2,66	1,67
Levadura	-	30,97	23,88
MeOH	-	- <sup>2</sup>	- <sup>2</sup>
<b>EDAR C (BLOQUE DE ENSAYOS 2)</b>			
Lodo digerido EDAR	6,94	3,44	2,16
Lodo mixto EDAR	6,07	4,04	2,96
Levadura	-	32,29	24,57
MeOH	-	- <sup>2</sup>	- <sup>2</sup>
<b>EDAR B / EDAR C (BLOQUE DE ENSAYOS 3)</b>			
Lodo digerido EDAR B	7,07	3,67	2,23
Lodo mixto EDAR B	7,07	4,09	2,99
Lodo digerido EDAR C	6,94	3,31	1,92
Lodo mixto EDAR C	5,80	3,92	2,75
Levadura	-	33,50	26,00
MeOH	-	- <sup>2</sup>	- <sup>2</sup>

<sup>1</sup>m.f. = masa fresca (hidratada); m = masa deshidratada.

<sup>2</sup>Se considera como materia orgánica la totalidad de su contenido.

#### d) Metodología de ensayo.

El ensayo de medida de potencial de biometanización en discontinuo, de forma general, tiene como finalidad obtener información preliminar sobre la fiabilidad del uso de determinadas sustancias en un proceso de digestión anaerobia.

En este caso particular, dicha información será útil para conocer el potencial de biometanización en discontinuo de sistemas con distinta composición que favorezcan el crecimiento de las bacterias del género *Methanosarcina*, ya que con ello se pretende mejorar el rendimiento de producción de biogás.

Para la realización de los ensayos se ha seguido la metodología descrita por la **norma alemana VDI 4630**, la cual proporciona las pautas para la realización de ensayos de fermentación de materiales orgánicos, así como los principios básicos de caracterización de las distintas sustancias, recogida de datos, etc.

La sistemática seguida en cada una de los ensayos es:

- Medida de pH, ST y SV de lodos y aditivos.
- Preparación de las mezclas según relación lodo/aditivo considerada (en base a SV).
- Medida del pH, ST y SV de las mezclas.
- Preparación del equipo y fijación de la temperatura de fermentación (35°C).
- Purga del sistema con nitrógeno (con el fin de comprobar las celdas de medida de gas y conseguir condiciones anaerobias en los reactores de fermentación).
- Comienzo del ensayo.
- El ensayo finaliza a los 30 días de operación, o bien cuando la producción de metano es insignificante (< 5ml/día).
- Medida de pH, ST y SV del material digerido.

El biogás producido en los reactores durante el ensayo en cuestión se hace pasar a través de una disolución de NaOH 3M donde quedan absorbidos el CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S. El volumen de gas metano libre de CO<sub>2</sub> es medido en celdas multi-flujo, las cuales envían señales a la DAQ (*Caja de Adquisición de Datos*) en cada medida. El software AMPTS recoge los datos y se actualiza cada vez que una celda emite señal. Los datos finales obtenidos son datos normalizados en presión y temperatura.

#### 4.2.1.2.- En el estudio del proceso de digestión anaerobia en semicontinuo con levadura.

##### a) Metodología de los ensayos.

De la misma manera que en los ensayos previos de medida de potencial de biometanización en discontinuo, para la realización de los ensayos de co-digestión en semicontinuo, se ha adoptado la metodología descrita por la **norma alemana VDI 4630**.

El procedimiento experimental consiste en introducir diariamente los volúmenes de lodo, y/o aditivo, de acuerdo a la carga orgánica, o volumen de trabajo, fijados. Previo a la carga del digestor, se extrae del mismo un volumen de lodo digerido igual a esta carga que se adicionará. En el caso en que se produzca un descenso, o un aumento del volumen útil del reactor, se procederá a descargar una cantidad de lodo digerido inferior o superior a la cargada ese día, manteniendo así constante el volumen del digestor.

A fin de determinar el efecto de la adición de aditivos al lodo mixto de la EDAR, uno de los digestores (*blanco*), es cargado cada día únicamente con lodo mixto, con unos valores de carga orgánica similares a los de operación de la EDAR. El otro digestor (*ensayo*) es operado exactamente igual que el primero, con la única diferencia del incremento de la carga orgánica de alimentación realizado mediante la aportación de aditivos, junto con la misma cantidad de lodo mixto que se venía adicionando. La adición de aditivo, se incrementa de forma progresiva mientras no se observe efecto negativo en el rendimiento del proceso.

##### b) Caracterización de los componentes.

El ensayo se ha realizado utilizando lodo digerido y lodo mixto de la EDAR C, así como levadura húmeda comercial de panadería. El lodo mixto está compuesto por mezcla de lodos de los procesos primario y biológico, o secundario, respectivamente.

En la Tabla 4.6 se muestra la caracterización inicial de los lodos de la EDAR C y del aditivo utilizado diariamente en la alimentación a los digestores.

**Tabla 4.6.-** Caracterización inicial de los lodos de la EDAR C y la levadura utilizados en la alimentación de los digestores.

<b>Residuo</b>	<b>Semana</b>	<b>pH</b>	<b>CE (mS/cm)</b>	<b>%ST (m/m.f.)</b>	<b>%SV (m/m.f.)</b>	<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N (mg/L)</b>	<b>Alcalinidad (mg CaCO<sub>3</sub>/L)</b>	<b>AGV (mg CH<sub>3</sub>COOH/L)</b>
<b>Lodo digerido</b>	0	7,10	5,14	4,28	2,61	830	1.850	180
<b>Lodo mixto</b>	1	7,18	5,47	4,62	3,08	610	213	300
	2	6,90	5,60	4,54	3,65	420	450	195
	3	6,44	3,47	2,60	2,02	447	600	120
	4	6,12	5,93	3,70	2,75	190	650	630
	5	6,29	5,39	3,13	2,47	360	513	825
<b>Levadura</b>	2	N.A	N.A	19,80	17,69	N.A.	N.A.	N.A.
	3	N.A	N.A	34,31	32,18	N.A.	N.A.	N.A.
	4	N.A	N.A	32,55	29,12	N.A.	N.A.	N.A.
	5	N.A	N.A	31,97	30,21	N.A.	N.A.	N.A.

c) Arranque, puesta en marcha y operación con los digestores.

Las condiciones de operación en los digestores a escala piloto deben ser controladas a lo largo del ensayo de acuerdo a un plan experimental definido previamente.

La temperatura de operación del proceso se fija dentro del rango mesofílico de la fermentación; la velocidad de agitación se ha fijado en un valor constante de 12 rpm, y el caudal de alimentación de lodo mixto se mantiene en 500 ml/día en ambos digestores.

Se pretende encontrar la carga de alimentación óptima (lodo y levadura) que genere la máxima producción de gas, pero teniendo en cuenta no sobrepasar determinados límites que pudieran conducir a la inhibición o sobrecarga del sistema, por ello, durante todo el ensayo, debe mantenerse:

Concentración de sólidos totales (ST) en la alimentación > del 6% (p/v).

Concentraciones de nitrógeno amoniacal en el digestor > 2,5 g N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/L

Concentraciones de ácidos grasos volátiles (AGV) en el digestor > 2 g AcH/L.

pH en el digestor entre 6 y 8.

La puesta en marcha de un reactor anaerobio resulta de vital importancia para el posterior desarrollo del ensayo. Por ello, los ensayos se articulan en diferentes fases de operación. Dichas fases son:

- **Fase de adaptación. Fase 0.** En el paso previo a la puesta en marcha de los digestores, éstos se cargan con 10 litros de lodo digerido anaerobio de la EDAR que aportará las bacterias anaerobias al proceso. Para evitar que se falseen los resultados del ensayo, el lodo digerido se deja reposar durante cuatro días, intervalo de tiempo suficiente para que se produzca la completa desgasificación del mismo.
- **Fase de arranque. Fase I.** El objetivo de dicha fase es alcanzar en ambos reactores condiciones similares de funcionamiento que los digestores de las EDAR a escala real. Por ello, se alimentan en semicontinuo ambos

digestores únicamente con lodo mixto durante dos días (que ya contienen lodo digerido de la fase anterior). La carga se lleva a cabo mediante el uso de una bomba peristáltica, todos los días y a la misma hora (exceptuando los fines de semana).

- **Fase de puesta en marcha. Fase II.** En esta fase, el reactor control o blanco, se alimenta en semicontinuo con la misma cantidad de lodo mixto que en la fase anterior, mientras que en el reactor de ensayo se realiza dicha alimentación en semicontinuo con una mezcla formada por lodo mixto y aditivo (en este caso, levadura). Esta descarga y carga se hace a diario (exceptuando sábados y domingos), a la misma hora y el volumen que se descarga de lodo digerido de los digestores, es el mismo que se carga de lodo mixto en el caso del reactor blanco y de mezcla de lodo mixto, aditivo y/o residuo, en caso del reactor ensayo. Este proceso de vaciado y llenado se lleva a cabo con el uso de una bomba peristáltica.

En la Tabla 4.7 se muestra el diseño de los ensayos según las fases que lo conforman (F0, FI y FII) y la carga orgánica que aportan tanto el lodo solo (reactor blanco) como la mezcla lodo-levadura (reactor ensayo). La fase II se opera de forma que la alimentación de levadura sea del 2%  $p/v_{alim}$ . durante las dos primeras semanas y del 3%  $p/v_{alim}$ . durante las dos restantes.

**Tabla 4.7.- Fases del ensayo en los digestores. Cantidad de componentes alimentados en cada una de las fases del ensayo.**

Nº Fase		Nº días	Fase	OLR Digestor Ensayo (g <sub>sv</sub> /L.día) <sup>1</sup>	OLR Digestor Blanco (g <sub>sv</sub> /L.día)	Cantidad L <sub>mixt</sub> (g) <sup>2</sup>	Cantidad Lev (g) <sup>3</sup>
<b>F0</b>	S1	3	Desgasificación	NA	NA	0	0
<b>FI</b>	S1	5	Arranque	1,47	1,47	500	0
<b>FII</b>	S2	8	Operación	1,68	1,53	500	69,01
	S3	7	Operación	1,08	0,82	500	57,01
	S4	7	Operación	1,48	1,12	500	86,00
	S5	7	Operación	1,20	0,88	500	71,00

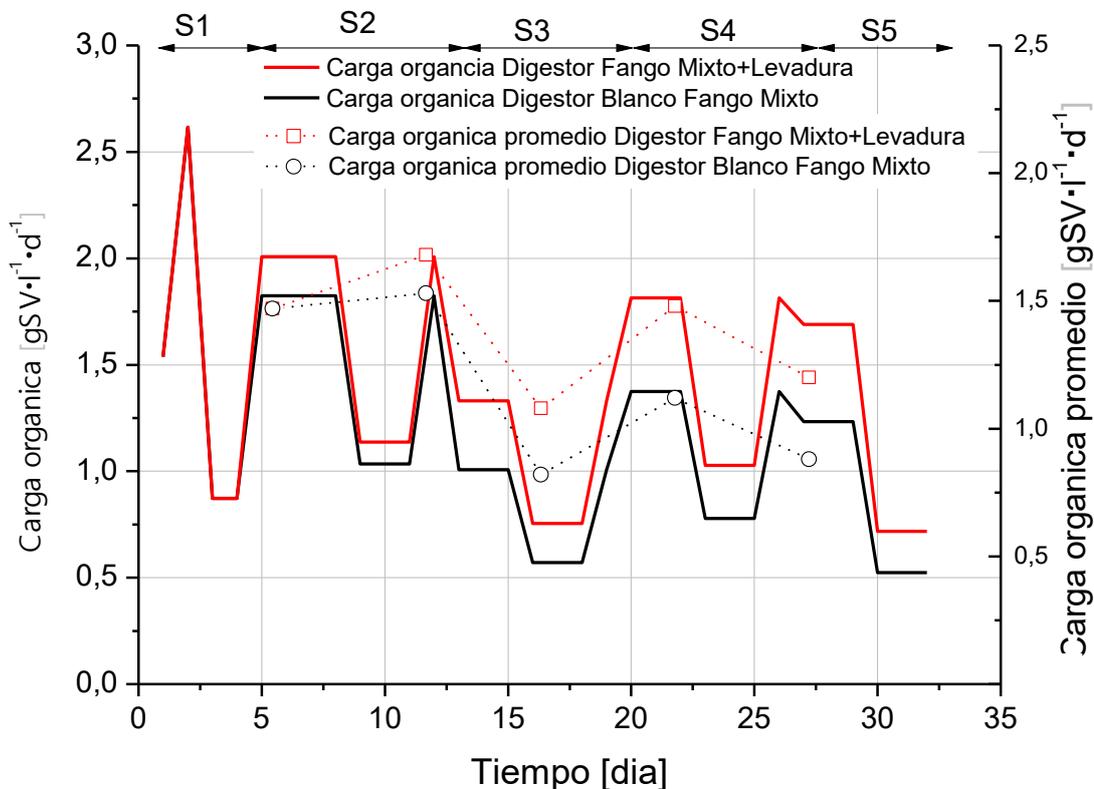
<sup>1</sup> El promedio se ha calculado en base a toda la semana, incluyendo los fines de semana.

<sup>2</sup> Cantidad diaria de lunes - jueves. Masa de 850 g alimentado el viernes.

<sup>3</sup> Cantidad total de levadura durante la semana.

OLR: Carga orgánica de alimentación.

En la Figura 4.5 se muestra la carga orgánica de alimentación (OLR) a lo largo del ensayo. Se aprecian descensos bruscos de OLR durante 2 días / semana debido a que los días correspondientes al fin de semana no se alimentan los reactores. Para compensar este descenso de OLR y evitar la sobrecarga del reactor, cada viernes se alimenta una cantidad superior a la habitual de lodo mixto y levadura.



**Figura 4.5.-** Fases de alimentación de la carga orgánica a lo largo del ensayo para ambos reactores.

#### d) Seguimiento y control del proceso.

El seguimiento y control del proceso se ha realizado mediante la medida de los diferentes parámetros, con frecuencia variables, para el perfecto control del mismo. La Tabla 4.8 muestra las determinaciones analíticas realizadas, tanto en la descarga del material digerido, como en el biogás generado.

Las variables fundamentales son: reducción de materia volátil en el digestor y la producción y composición de biogás generado. Para ello, se miden los ST y SV cada vez que se recibe un nuevo lote de lodo mixto y, diariamente, en la descarga de lodo digerido. Las lecturas del contador de biogás se hacen diariamente. Dos veces por semana se mide la composición del biogás acumulado.

Por otra parte, para el control de la estabilidad del proceso de digestión, y poder prevenir posibles efectos inhibitorios, se mide diariamente pH y conductividad (CE) en el lodo digerido (salida de los reactores), y una vez por semana, en dicho lodo, la alcalinidad (ALK<sub>T</sub>), los ácidos grasos volátiles (AGV) y el nitrógeno total y amoniacal. El análisis del gas producido durante la degradación anaerobia conjunta de la levadura y el lodo mixto permite realizar un seguimiento del proceso.

**Tabla 4.8.-** Determinaciones analíticas para el control y seguimiento del proceso de digestión en las muestras de alimentación, lodo digerido y biogás generado.

<b>Analíticas correspondientes a la alimentación<sup>1</sup></b>	<b>Analíticas correspondientes al lodo digerido</b>	<b>Analíticas del biogás</b>
<p>pH, CE ST, SV Nitrógeno total<sup>2</sup> Nitrógeno amoniacal<sup>2</sup> Alcalinidad Total<sup>2</sup> Ácidos grasos volátiles<sup>2</sup></p>	<p>pH, CE ST, SV Nitrógeno total Nitrógeno amoniacal Alcalinidad Total Ácidos grasos volátiles</p>	<p>Volumen acumulado Volumen diario Composición (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, SH<sub>2</sub>)<sup>3</sup></p>

<sup>1</sup>Las analíticas correspondientes a la alimentación se realizarán únicamente cuando se renueven los aditivos.

<sup>2</sup> Se medirán dichos parámetros en el lodo mixto.

<sup>3</sup> La concentración de SH<sub>2</sub> en los digestores se medirá en los últimos días de ensayo.

#### 4.2.2.- Ensayos con residuos.

##### 4.2.2.1.- En el estudio del potencial de biometanización en discontinuo.

###### a) Selección de residuos.

Esta parte experimental incluye 3 bloques de ensayos, con 15 experimentos cada uno, de un mes de duración, y usando en vez de levadura y metanol, como en los bloques 1, 2 y 3, aditivos consistentes en residuos. En estos tres bloques de ensayos no se les ha adicionado lodo mixto a los reactores debido a que por sí solos los residuos adicionados llevan suficiente materia orgánica para que las bacterias metanogénicas puedan producir biogás sin necesidad de añadir lodo mixto.

A continuación, se describe qué componentes se han usado en los bloques de ensayos 4, 5 y 6.

El Bloque 4 se ha realizado utilizando lodo digerido procedente del digestor anaerobio de la EDAR A, y como aditivos los siguientes:

- *Lixiviado*. Procedente de un vertedero de residuos sólidos urbanos (RSU).
- *Residuos de matadero*. Compuestos por hígado, corazón y pulmón triturados con un tamaño inferior a 2 mm.
- *Residuos ganaderos* procedentes de granja porcina.

El Bloque 5 se ha realizado utilizando lodo digerido procedente del digestor anaerobio de la EDAR C y como aditivos los siguientes residuos:

- *Residuos de matadero*. Compuestos por hígado, corazón y pulmón triturados con un tamaño inferior a 3 mm.
- *Residuos ganaderos*. Procedentes de granja porcina.
- *Residuos vegetales*. Procedente de una industria fabricante de zumos.

El Bloque 6 se ha realizado utilizando lodo digerido procedente del digestor anaerobio de la EDAR B y como aditivos se utilizaron los siguientes residuos:

- *Residuo Industrial*. Procedente de una empresa fabricante de bollería.
- *Lixiviado*. Procedente de un vertedero de RSU.
- *Residuos vegetales*. Procedente de una industria fabricante de zumos refrigerados.

Los lodos y aditivos de la EDAR B han sido caracterizados según pH, sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) (Tabla 4.11).

#### b) Experimentos programados.

El diseño de experimentos para los ensayos del Bloque 4 (EDAR A) propuesto según el tipo de componente y la carga Lodo digerido/aditivo es el siguiente (todos los lodos utilizados son de la EDAR A):

- Reactores de control: Lodo digerido de la EDAR A.
- Combinación 1 (M1): Lodo digerido + Residuos de matadero, lixiviado, y residuos ganaderos.  
Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,5; 0,075; 0,425 (base SV).
- Combinación 2 (M2): Lodo digerido + Residuos de matadero.  
Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,5 (base SV).
- Combinación 3 (M3): Lodo digerido + Lixiviado.  
Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,1 (base SV).
- Combinación 4 (M4): Lodo digerido + Residuos ganaderos.  
Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,5 (base SV).

El diseño de experimentos para el Bloque 5 (EDAR C) es el siguiente (todos los lodos utilizados son de la EDAR C):

- Reactores de control: Lodo digerido de la EDAR C.
- Combinación 1 (M1): Lodo digerido + Residuos de matadero, deyecciones ganaderas y residuos vegetales.

- Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,5; 0,5; 0,5 (base SV).
- Combinación 2 (M2): Lodo digerido + Residuos de matadero.  
Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,5 (base SV).
- Combinación 3 (M3): Lodo digerido + Deyecciones ganaderas.  
Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,5 (base SV).
- Combinación 4 (M4): Lodo digerido + Residuos Vegetales.  
Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,5 (base SV).

El diseño de experimentos para el Bloque 6 (EDAR B) es el siguiente (todos los lodos utilizados son de la EDAR B):

- Reactores de control: Lodo digerido de la EDAR B.
- Combinación 1 (M1): Lodo digerido + Residuo industrial, residuos vegetales y lixiviado.  
Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,5; 0,425; 0,075 (base SV).
- Combinación 2 (M2): Lodo digerido + Residuo industrial.  
Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,5 (base SV).
- Combinación 3 (M3): Lodo digerido + Residuos Vegetales.  
Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,5 (base SV).
- Combinación 4 (M4): Lodo digerido + Lixiviado.  
Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,05 (base SV).

Los datos resumidos de toda esta programación de experimentos, se encuentran estructurados en la Tabla 4.9, siguiente:

**Tabla 4.9.-** Programación de experimentos de los bloques de Ensayos 4, 5 y 6.

<b>Combinación</b>	<b>Bloque 4 (EDAR A)</b>	<b>Bloque 5 (EDAR C)</b>	<b>Bloque 6 (EDAR B)</b>
$L_{dig}$	$L_{dig}$ A	$L_{dig}$ C	$L_{dig}$ B
Combinación 1	Lodo digerido + Residuos de matadero, lixiviado, y deyecciones ganaderas. Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,5; 0,075; 0,425 (base SV).	Lodo digerido + Residuo industrial, Residuos vegetales y lixiviado. Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,5; 0,425; 0,075 (base SV).	Lodo digerido + Residuo industrial, Residuos vegetales y lixiviado. Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,5; 0,425; 0,075 (base SV).
Combinación 2	Lodo digerido + Residuos de matadero. Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,5 (base SV). (Ver Tabla A.2.2).	Lodo digerido + Residuos de matadero. Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,5 (base SV). (Ver Tabla A.2.6).	Lodo digerido + Residuo industrial. Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,5 (base SV). (Ver Tabla A.2.9).
Combinación 3	Lodo digerido + Lixiviado. Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,1 (base SV). (Ver Tabla A.2.3).	Lodo digerido + Deyecciones ganaderas. Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,5 (base SV). (Ver Tabla A.2.7).	Lodo digerido + Vegetales. Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,5 (base SV).
Combinación 4	Lodo digerido + Deyecciones ganaderas. Relación Lodo digerido / Aditivo 2:0,5 (base SV) (Ver Tabla A.2.4).	Lodo digerido + Residuos Vegetales. Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,5 (base SV).	Lodo digerido + Lixiviado. Relación Lodo digerido/Aditivo 2:0,05 (base SV).

$L_{dig}$ : Lodo digerido

### c) Características de los componentes.

Los componentes utilizados en los 3 últimos ensayos de medida del potencial de biometanización en discontinuo han sido:

- *Lodo digerido.* Procedente de las tres EDAR: A, B y C.
- *Residuo de matadero.*
- *Lixiviado.* Procedente de un vertedero de RSU (Residuos Sólidos Urbanos).
- *Deyecciones ganaderas.*
- *Residuos vegetales.* Mezcla de residuos vegetales.
- *Residuo Industrial.* Procedente de una industria de confitería industrial.

Los componentes han sido caracterizados inicialmente según pH, sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV). Asimismo, han sido fijadas para el proceso, la temperatura de incubación (35°C) y temperatura ambiente (21°C).

El ensayo se ha realizado empleando lodo procedente del digestor anaerobio (lodo digerido) de las EDAR de la misma procedencia que el lodo mixto.

La siguiente tabla (Tabla 4.10) muestra información sobre las características de los distintos componentes usados en los ensayos.

**Tabla 4.10.-** Caracterización de los lodos y residuos utilizados en los bloques de Ensayos 4, 5 y 6 de las EDAR A, B y C.

<b>EDAR A (BLOQUE DE ENSAYOS 4)</b>				
<b>COMPONENTE</b>	<b>pH</b>	<b>Conductividad [mS/cm]</b>	<b>ST [% m/m.f.]<sup>1</sup></b>	<b>SV [% m/m.f.]<sup>1</sup></b>
Lodo digerido	7,27	7,27	4,05	2,43
Residuos de matadero	N.D.	N.D.	26,88	23,30
Lixiviado	8,26	35,40	3,08	0,77
Deyecciones ganaderas	7,75	10,90	1,48	0,74
<b>EDAR C (BLOQUE DE ENSAYOS 5)</b>				
Lodo digerido	6,91	5,18	6,29	3,37
Residuos de matadero	N.D.	N.D.	27,00	23,21
Deyecciones ganaderas	7,41	10,90	0,80	0,35
Residuos vegetales	4,08	N.D.	25,53	24,18
<b>EDAR B (BLOQUE DE ENSAYOS 6)</b>				
Lodo digerido	7,25	8,82	4,49	2,45
Residuo Industrial	5,22	941 <sup>(*)</sup>	4,26	4,16
Residuos vegetales	4,08	935 <sup>(*)</sup>	27,54	25,59
Lixiviado	8,40	23,4	1,28	0,35

<sup>1</sup>m.f. = masa fresca (húmeda). m = masa seca.

#### d) Metodología de ensayo.

La metodología seguida en cada uno de los bloques para la realización de los ensayos es la siguiente:

Medida de pH, ST y SV de componentes.

Preparación de las combinaciones según relación Lodo digerido/Aditivo, en base a SV.

Medida del pH, ST y SV de las mezclas.

Preparación de los equipos y fijación de la temperatura de fermentación (35°C).

Purga del sistema con nitrógeno (con el fin de comprobar las celdas de medida de gas y conseguir condiciones anaerobias en los reactores de fermentación).

Comienzo del ensayo.

El ensayo finaliza a los 30 días de operación, o bien cuando la producción de metano es insignificante (< 5ml/día).

Medida de pH, ST y SV del material digerido.

El biogás producido durante el ensayo se hace pasar a través de una disolución de NaOH 3M, donde quedan absorbidos el CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S. El volumen de gas metano libre de CO<sub>2</sub> es medido en celdas multi-flujo, las cuales envían señales a la DAQ (Caja de Adquisición de Datos) en cada medida. El software AMPTS recoge los datos y se actualiza cada vez que una celda emite señal. Los datos finales obtenidos son datos normalizados.

#### 4.2.2.2.- En el estudio del proceso de digestión anaerobia en semicontinuo con residuo industrial.

Se ha llevado a cabo un bloque de ensayos de digestión anaerobia en semicontinuo tras los bloques de ensayos en discontinuo con residuos, usando como residuo el residuo industrial cuyos resultados a nivel técnico y económico fueron mejores en los bloques 4, 5 y 6 de ensayos de potencial de biometanización en discontinuo.

##### a) Metodología de los ensayos.

De la misma manera que en los ensayos previos de medida de potencial de biometanización en discontinuo, para la realización de los ensayos de co-digestión en semicontinuo, se ha adoptado la metodología descrita por la **norma alemana VDI 4630**.

El procedimiento experimental consiste en introducir diariamente los volúmenes de lodo y/o aditivo de acuerdo a la carga orgánica, y volumen de trabajo, fijados. Previo a esta recarga del digestor, se extrae del mismo un volumen de lodo digerido igual a esta carga que se adiciona. En el caso en que se produzca un descenso, o un aumento del volumen útil del reactor, se procederá a descargar una cantidad de lodo digerido inferior o superior a la cargada de ese día, manteniendo así constante el volumen del digestor.

A fin de determinar el efecto de la adición de aditivos al lodo mixto de la EDAR, uno de los digestores (*blanco*), es cargado cada día únicamente con lodo mixto, con unos valores de carga orgánica similares a los de operación de la EDAR. El otro digestor (*ensayo*) es operado exactamente igual que el primero, con la única diferencia del incremento de la carga orgánica de alimentación realizado mediante la aportación de aditivo junto con la misma cantidad de lodo mixto que se venía adicionando. La adición de aditivo se incrementa de forma progresiva mientras no se observe efecto negativo en el rendimiento del proceso.

#### b) Caracterización de los componentes.

El ensayo se ha realizado utilizando:

- Lodo mixto de la EDAR B. Lodo mixto compuesto por la mezcla de lodo del proceso primario y del biológico (aerobio).
- Lodo digerido de la EDAR B de salida de los digestores.
- Residuo Industrial. Procedente de una industria fabricante de productos de confitería.

En la Tabla 4.11 se muestra la caracterización inicial del lodo digerido y de cada uno de los componentes utilizados en la alimentación a los digestores. También quedan reflejadas en la tabla las diferentes caracterizaciones de los lotes semanales utilizados con cada aditivo. La existencia y caracterización de más de un lote por aditivo se debe a que a pesar de que todos los componentes permanecen almacenados a 4°C, se utiliza una nueva muestra cada vez para paliar los envejecimientos y, por lo tanto, la posible modificación en las características de los mismos.

**Tabla 4.11.-** Caracterizaciones iniciales de los lodos y el aditivo (residuo industrial) utilizados en la alimentación de los digestores.

Residuo	Semana	pH	CE (mS/cm)	%ST (m/m.f)	%SV (m/m.f)	N <sub>T</sub> (g/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (g/L)	Alcalinidad (g CaCO <sub>3</sub> /L)	AGV (g CH <sub>3</sub> COOH/L)
Lodo digerido de la EDAR B	0	7,15	7,36	3,94	2,35	N.A.	N.A.	2,08	0,28
Lodo mixto de la EDAR B	1	7,26	19,40	3,41	1,98	2,45	0,63	5,79	0,69
	2	7,48	14,60	8,12	4,72	4,28	3,23	3,88	1,76
	3	6,32	3,39	5,43	3,51	2,72	0,72	1,09	0,45
	4	7,14	19,20	4,34	3,10	3,59	1,95	5,08	0,89
	5-6	6,92	7,49	3,76	2,62	2,96	0,83	1,21	1,15
Residuo industrial	1-5	5,47	0,697	19,46	19,03	< 0,01	N.A.	0,09	0,08
		4,87	0,741	19,20	19,12	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

63

AGV: Ácidos grasos volátiles.  
 ST: Sólidos totales.  
 CE: Conductividad eléctrica.  
 SV: Sólidos volátiles.  
 m.f: Masa fresca (hidratada).  
 m: Masa seca (deshidratada).  
 N.A.: No analizado.  
 NT: Nitrógeno Total.  
 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N: Nitrógeno Amoniacal.

### c) Arranque, puesta en marcha y operación con los digestores.

Para llevar a cabo estos ensayos de co-digestión en semicontinuo se han utilizado dos bancos de digestión anaerobia a escala planta piloto:

- Digestor 1: Proceso de digestión anaerobia con alimentación solo de lodos digeridos y mixtos de la EDAR B (Digestor blanco).
- Digestor 2: Proceso de digestión anaerobia utilizando lodos mixtos y digeridos de la EDAR B y residuo industrial (Digestor ensayo).

La temperatura de operación del proceso se fija dentro del rango de operación mesofílico de los microorganismos. La velocidad de agitación se mantuvo, a lo largo del ensayo, a un valor constante de 12 rpm.

La experimentación en el digestor ensayo se realizó manteniendo estables las condiciones de operación, adicionando 550 ml de lodo mixto por día y extrayendo del mismo igual cantidad, mientras que se iban aumentando las cargas orgánicas del residuo en la alimentación con el tiempo.

Como se pretende encontrar la carga de alimentación óptima que genere la máxima producción de gas, pero teniendo en cuenta no sobrepasar determinados límites que pudieran conducir a la inhibición o sobrecarga del sistema se fijaron:

- Concentración de sólidos totales (ST) en la alimentación > del 6% (p/v).
- Concentraciones de nitrógeno amoniacal en el digestor > 2,5 g N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/l.
- Concentraciones de ácidos grasos volátiles (AGV) > 2g ACh/L.
- pH en el digestor entre 6 y 8.

La puesta en marcha de los reactores anaerobios resulta de vital importancia para el posterior desarrollo del ensayo. Por ello, estos ensayos se han dividido en diferentes fases.

Estas fases son:

**0) Fase de adaptación. Fase 0.** En el paso previo a la puesta en marcha de los digestores, éstos se cargan con 10 L de lodo digerido anaerobio de la EDAR. Para

evitar que se falseen los resultados del ensayo, el lodo digerido se deja reposar durante cuatro días, intervalo de tiempo suficiente para que se produzca la completa desgasificación del mismo.

**1) Fase de arranque. Fase I.** El objetivo de dicha fase es alcanzar en ambos reactores las mismas condiciones de funcionamiento que actualmente están teniendo lugar en los digestores anaerobios de la EDAR B. Por ello, durante dos días se alimentan ambos digestores únicamente con lodo mixto. Una vez reproducida la operación de la EDAR de origen, dará comienzo la siguiente fase de ensayo (Fase II).

**2) Fase de operación. Fase II.** En esta fase, el reactor de control es alimentado diariamente con la misma cantidad de lodo mixto que en la fase anterior, mientras que el reactor de ensayo lo es con una mezcla formada por lodo mixto y residuo industrial, incrementándose, por lo tanto, la carga orgánica del proceso. Cabe mencionar, cómo a lo largo del ensayo la alimentación con lodo mixto se ha mantenido constante en ambos digestores, (550 g diarios de lunes a jueves y 750 g el viernes), salvo excepciones puntuales durante la semana 2, debido a elevada concentración de sólidos del lodo mixto.

En la Tabla 4.12 se muestra el diseño del ensayo según las fases que lo conforman y la carga alimentada a los reactores durante cada una de las semanas (S.1 a S.6).

**Tabla 4.12.-** Fases del ensayo en los digestores. Cantidad de aditivo y lodo alimentado en cada una de las fases del ensayo.

Nº Fase	Nº días	Fase	OLR promedio (gsv/L·día) <sup>2</sup>	Cantidad de L <sub>mixt</sub> (g) <sup>3</sup>	Cantidad de RI (g) <sup>2</sup>
F0	4	Desgasificación	NA	0	0
FI	2	Arranque	1,09	550	0
FII	S1	Operación	1,37	550	30,6
	S2 <sup>1</sup>	Operación	1,78	500	15,4
	S3	Operación	1,88	550	29,1
	S4	Operación	2,11	550	41,9
	S5	Operación	2,15	550	57,6
	S6	Operación	4,03	550	135,7

<sup>1</sup>En el transcurso de esta semana, debido al elevado valor de ST = 4,72% y SV = 8,12% del lodo mixto, se procedió a disminuir la cantidad de este lodo mixto de la alimentación.

<sup>2</sup>El promedio se ha calculado en base a toda la semana, incluyendo los fines de semana (de lunes a lunes).

<sup>3</sup>Los lodos son considerados con densidad 1 Kg/L.

L<sub>mixt</sub>: Lodo Mixto.

RI: Residuo Industrial.

OLR: Carga Orgánica de Alimentación.

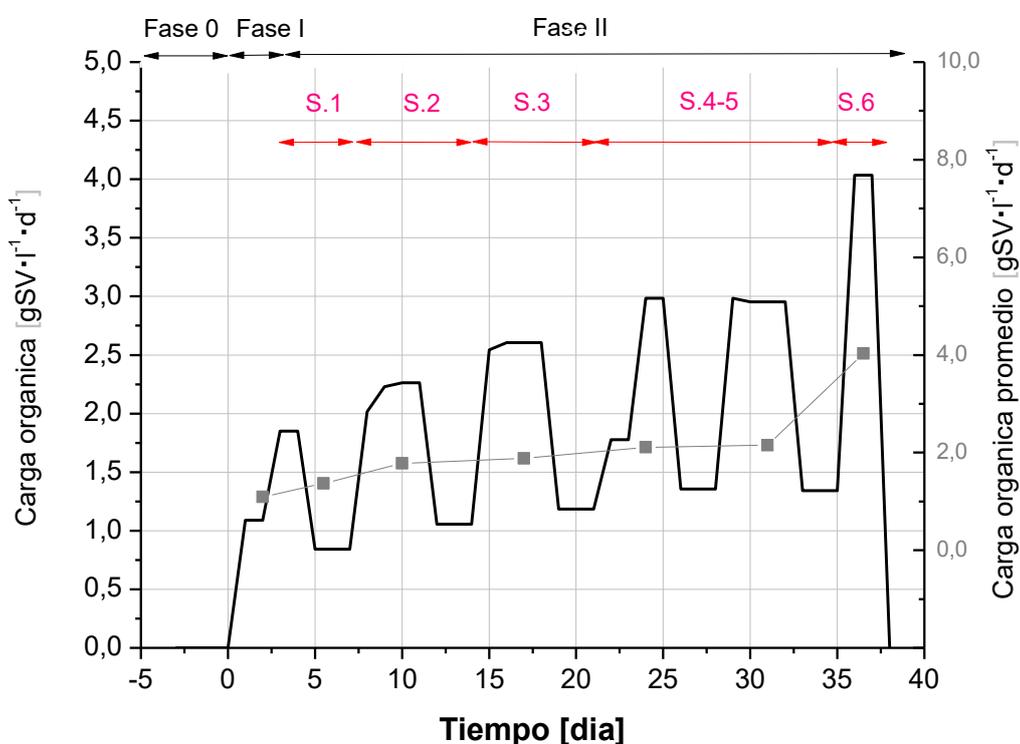
En la Tabla 4.12 se expone que durante la S2 el volumen de alimentación con lodo mixto disminuye ligeramente (500 g) debido al alto contenido en ST y SV presente en el mismo. Dicha variación se realiza como medida de ajuste de la elevada carga orgánica de alimentación (OLR) obtenida, y por la cual, la cantidad de residuo industrial a añadir sería excesivamente baja (esta alta carga puede ser originada por la posible variabilidad de contenidos del lodo mixto).

Con el fin de asegurar la correcta degradación del residuo industrial en el digestor, se procedió a realizar la alimentación inicial a baja carga de OLR. A continuación, esta carga orgánica se aumenta gradualmente durante las dos primeras semanas en el digestor de ensayo mediante el incremento de la cantidad de residuo industrial, siendo la cantidad de lodo mixto mantenida constante en cada carga. Una vez que el sistema alcanza condiciones de aclimatación, la carga de alimentación, considerada como óptima, se mantuvo durante las otras semanas. Los últimos días del ensayo, y antes de proceder al vaciado del digestor, se lleva a cabo un incremento considerable de la carga de

alimentación, durante 2 días. El objetivo de dicho incremento es comprobar si el sistema no se colapsa cuando se incrementa notablemente la carga de residuo.

Hay que destacar que la totalidad del lodo producido en las EDAR habitualmente es enviado a digestión anaerobia en el proceso real, por lo que la reproducción del proceso real a escala piloto debe realizarse de forma equivalente manteniendo la alimentación de lodo mixto e incorporando las correspondientes cantidades adicionales de residuo industrial.

En la Figura 4.6 se muestra la carga orgánica de alimentación (OLR) a lo largo del ensayo. Se aprecian descensos bruscos de OLR durante 2 días por semana debido a que durante los días correspondientes al fin de semana no se produce alimentación de los reactores. Para compensar, en parte, esta situación del fin de semana y evitar la disminución de carga del reactor, cada viernes se adicionó una cantidad ligeramente superior de lodo mixto y residuo industrial relativa a la de los cuatro días anteriores (35% p/v de aumento sobre la alimentación diaria).



**Figura 4.6.-** Fases del suministro de la carga orgánica de alimentación para el reactor ensayo.

#### d) Seguimiento y control del proceso.

El seguimiento y control del proceso se ha realizado mediante la medida de diferentes parámetros a una determinada frecuencia, que abajo se indica, según su importancia para el control del proceso. En la Tabla 4.13 se muestran las determinaciones analíticas, que se han ido realizando.

Las magnitudes fundamentales que se han ido evaluando a lo largo del proceso, para medir el rendimiento del mismo, son la reducción de materia volátil en el digestor, así como la producción y composición del biogás en el mismo.

Con tal fin, se han medido semanalmente (cada vez que se recibe un nuevo lote) los ST y SV en la carga de alimentación y diariamente en la descarga de lodo digerido. Igualmente, se toman lecturas del contador de biogás diariamente. Dos veces por semana se mide, además, la composición del biogás generado acumulado. Por otra parte, para realizar un control de la estabilidad del proceso de digestión, y poder prevenir posibles efectos inhibitorios se mide diariamente pH y conductividad (CE) en el lodo digerido, y una vez por semana la alcalinidad ( $ALK_T$ ) y los ácidos grasos volátiles (AGV), el nitrógeno total y amoniacal, también en el lodo digerido. El análisis del gas producido durante la degradación anaerobia del residuo industrial y del lodo mixto permite realizar el seguimiento del proceso.

**Tabla 4.13.-** Determinaciones analíticas para el control y seguimiento del proceso de digestión en las muestras de alimentación, digestato y análisis del biogás generado.

<b>Analíticas correspondientes a la alimentación<sup>1</sup></b>	<b>Analíticas correspondientes al digestato</b>	<b>Análisis del biogás</b>
<p>pH, CE ST, SV Nitrógeno total<sup>2</sup> Nitrógeno amoniacal<sup>2</sup> Alcalinidad Total<sup>2</sup> Ácidos grasos volátiles<sup>2</sup></p>	<p>pH, CE ST, SV Nitrógeno total Nitrógeno amoniacal Alcalinidad Total Ácidos grasos volátiles</p>	<p>Volumen acumulado Volumen diario Composición (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, SH<sub>2</sub>)<sup>3</sup></p>

<sup>1</sup> Las analíticas correspondientes a la alimentación se realizarán únicamente cuando se renueven los componentes.

<sup>2</sup> Debido a la naturaleza heterogénea del propio residuo industrial y al bajo contenido en nitrógeno dichos parámetros son medidos cada vez que se produce su renovación.

<sup>3</sup> La proporción de SH<sub>2</sub> en las últimas semanas de ensayos no fue determinada a causa de la saturación de la sonda de medida del mismo.



*"La ignorancia afirma o niega rotundamente,  
la ciencia duda". Voltaire.*

## **5.- Resultados.**

### 5.1.- Ensayos con levadura y metanol.

#### 5.1.1.- Estudio del potencial de biometanización en discontinuo.

Los resultados obtenidos en cada uno de los bloques de ensayos (son tres bloques de ensayos con 15 reactores cada uno) llevados a cabo, han sido procesados por el software del equipo. Las correcciones realizadas por dicho software permiten compensar las variaciones de presión, temperatura y contenido de humedad, así como el efecto "headspace" (espacio libre de cabeza) las cuales causan la dilución del biogás al comienzo del ensayo, refiriendo dichos datos a volúmenes de gas normalizado (1 atm y 0°C a 0% de humedad) de cada reactor.

En los Bloques de Ensayos 1 y 2 se han realizado combinaciones con diferentes concentraciones de levadura y metanol, utilizando, para ello, lodo de la EDAR C. Tras el análisis de los resultados obtenidos en los Bloques 1 y 2, se realizó el Bloque 3, empleando las concentraciones óptimas de aditivos de los ensayos anteriores con lodos procedentes de las EDAR B y C, respectivamente.

#### 5.1.1.1.- Bloque de Ensayos 1.

La Tabla 5.1 muestra los resultados obtenidos con cada una de las combinaciones del Bloque de Ensayos 1. El análisis comparativo de los resultados puede realizarse mediante la observación de las siguientes magnitudes medidas: rendimiento de eliminación de sólidos volátiles, producción específica de metano  $V_{CH_4}$  (NL/g<sub>SV total alim.</sub>), (la cual indica la producción total de metano en relación a la cantidad total de SV introducida), y potencial de biometanización en discontinuo (BMP) de las sustancias empleadas.

El valor del BMP se obtiene al sustraer en cada caso el biogás generado por la combinación  $L_{mixt}+L_{dig}$  y considerando únicamente los gramos de SV de los aditivos añadidos (levadura, metanol, o mezcla de ambos).

Las curvas de biodegradabilidad de los Ensayos del Bloque 1 (con 15 experimentos) (Figura 5.1) muestran la existencia de diferencias significativas entre las combinaciones con metanol y con levadura. La adición de levadura produce curvas de biodegradabilidad similares en su forma a las curvas características de degradación de lodo mixto y siempre el volumen acumulado de metano es más alto que el que produce el metanol. También puede verse que el incremento de la levadura por encima del 6% supone disminución del metano.

Por su parte, las curvas correspondientes al metanol tienen dos fases: una fase inicial de inhibición durante los primeros 5 días de biodegradación, donde el caudal de producción de metano es menor de 5NL/día, y a continuación una segunda fase de crecimiento similar en cuanto a forma con las curvas de levadura. En los ensayos con metanol, la producción de  $CH_4$  durante los primeros días del ensayo es inferior a la del lodo digerido, lo que se considera un comportamiento atípico del aditivo causado por una posible inhibición inicial del proceso de digestión. Tras esta fase, la producción de gas se incrementa muy rápidamente para estabilizarse posteriormente, lo cual parece indicar que tras la inhibición inicial tiene lugar la adaptación de la biomasa al aditivo.

A pesar de la inhibición mostrada en los primeros días, a nivel general, la adición de metanol supone una mejora en el proceso de digestión de los lodos. Por otra parte, en el rango de concentraciones de metanol estudiadas, el potencial de producción de metano aumenta conforme aumenta la cantidad de metanol con respecto a la de lodo.

El mecanismo que regula la producción de metano por las bacterias metanógenas, y en concreto, por el género *Methanosarcina*, no se encuentra definido. Por lo tanto, la supuesta represión catabólica (posible inhibición) del intermedio acetato en presencia de metanol no es conocida, aunque se han

encontrado evidencias bibliográficas que coinciden en dicho comportamiento de depresión cuando se utiliza metanol como componente base de la reacción [28].

Por tanto, y a falta de pruebas microbiológicas, se podría pensar que el modelo de curva de biodegradabilidad seguida por las combinaciones con metanol indica una escasa conversión del metanol y de los intermedios del proceso (acetato) en metano, por parte de la población *methanosarcina* responsable de la fase metanogénica, en los primeros días del ensayo.

Las concentraciones de metanol utilizadas en el Bloque de Ensayos 1 fueron 4, 8 y 12 g DQO/L<sub>alim.</sub>, similares a las usadas por *Zandvoort et. al.* [27].

En la Tabla 5.1 se aprecia que la producción específica de metano de las mezclas de lodo mixto y digerido con levadura es superior al de la mezcla de lodos mixto y digerido únicamente; esto confirma el efecto positivo de la adición de la levadura. También se observa cómo la producción específica de metano disminuye al incrementar la concentración de levadura. En concreto, los mejores resultados se obtienen con la combinación 2 (3 % (p/v) LEVADURA).

Las levaduras comerciales aportan propiedades nutricionales, pero, a su vez, son hongos microscópicos capaces de realizar la descomposición mediante fermentación de azúcares, hidratos de carbono, etc. Por lo tanto, el exceso de levadura en los digestores podría competir por la materia orgánica disponible con las bacterias *Archaea* (metanogénicas). Las levaduras, además de necesitar fuentes de carbono, necesitan fuentes de nitrógeno, fósforo, vitaminas y microelementos y tienen la capacidad de generar dióxido de carbono y etanol durante el proceso de fermentación, pudiendo de esta forma derivar en la inhibición del proceso.

Para los componentes estudiados se observa un rendimiento de eliminación de SV superior en el digestor Ensayo al mostrado en la combinación de L<sub>dig</sub>+L<sub>mixt</sub> (digestor Blanco), cuyo rendimiento de eliminación es de aproximadamente 25%. Además, en ambos reactores, el porcentaje de eliminación de materia orgánica se incrementa con el aumento de la concentración en la alimentación. El

rendimiento de eliminación de volátiles es elevado en el caso de los reactores alimentados con levadura, variando desde 50 al 55% al incrementar la concentración de levadura desde el 3 al 8% (p/v). En el caso de los reactores alimentados con metanol, éstos muestran una eliminación del 38 al 48% según se incrementa la concentración en la alimentación desde 4 a 12  $\text{g}_{\text{DQO}}/\text{L}_{\text{alim}}$ .

**Tabla 5.1.-** Resultados del Bloque de Ensayos 1. Rendimiento de eliminación de SV, BMP en discontinuo y producción específica de metano.

BLOQUE DE ENSAYOS 1 (EDAR C)							
	Combinaciones	pH inicial	pH final <sup>1</sup>	SV alim. (g)	Rto. eliminación SV (%)	BMP <sup>3</sup> (NL/g SV aditivos)±SD	V <sub>CH4</sub> <sup>4</sup> (NL/g SV alim. <sup>2</sup> )±SD
1	L <sub>dig</sub> C	6,93	7,17	8,12	32,27	0,109 ± 0,004	0,109 ± 0,004
2	Lodo digerido y Lodo mixto	7,05	7,18	7,58	25,67	N. D.	N. D.
3	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +3 % (p/v) LEVADURA	7,05	7,38	10,44	50,31	0,499 ± 0,004	0,215 ± 0,001
4	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +6 % (p/v) LEVADURA	7,05	7,21	13,31	52,13	0,240 ± 0,005	0,165 ± 0,002
5	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +8 % (p/v) LEVADURA	7,05	7,00	15,22	55,09	0,152 ± 0,012	0,130 ± 0,006
6	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +4 g DQO/L <sub>alim.</sub> <sup>2</sup> MeOH	7,05	7,16	8,65	38,08	0,371 ± 0,025	0,140 ± 0,025
7	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +8 g DQO/L <sub>alim.</sub> <sup>2</sup> MeOH	7,05	7,13	9,71	43,75	0,393 ± 0,008	0,171 ± 0,008
8	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +12 g DQO/L <sub>alim.</sub> <sup>2</sup> MeOH	7,05	7,13	10,78	48,46	0,320 ± 0,000	0,171± 0,000

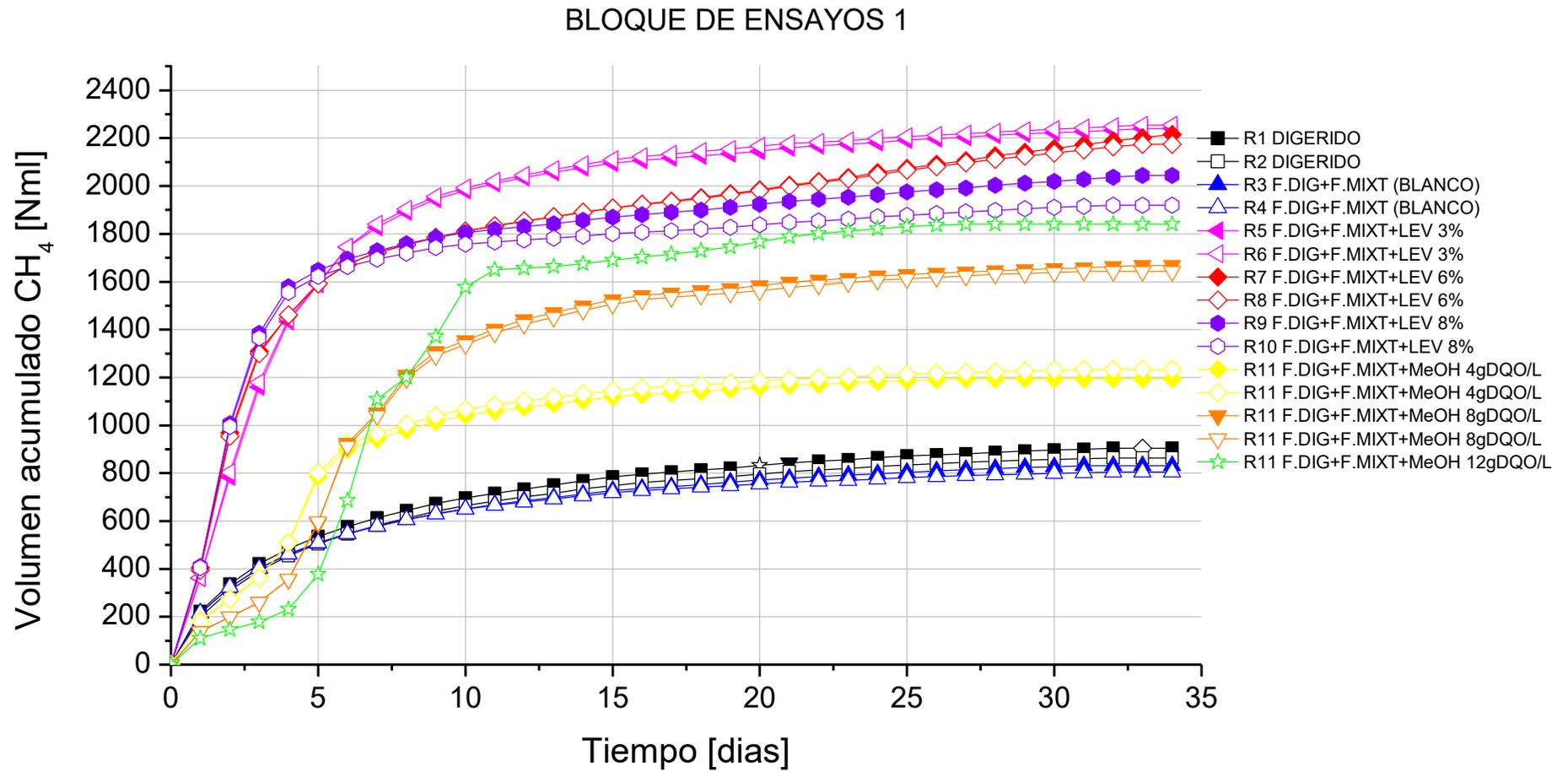
<sup>1</sup>pH promedio en cada combinación.

<sup>2</sup>Cuando se habla de alimentación (L<sub>alim</sub>), se refiere a mezcla de aditivos (levadura o metanol) y lodos (digerido y mixto).

<sup>3</sup>BMP= (V<sub>CH4</sub> total producido - V<sub>CH4</sub> originado por el lodo mixto - V<sub>CH4</sub> originado por el lodo digerido) / g SV aditivos.

<sup>4</sup>V<sub>CH4</sub> = (V<sub>CH4</sub> total producido - V<sub>CH4</sub> originado por el lodo mixto - V<sub>CH4</sub> originado por el lodo digerido) / g SV alimentación.

Todos los lodos utilizados en el Bloque 1 de Ensayos pertenecen a la EDAR C.



**Figura 5.1.-** Bloque de Ensayos 1. Volumen de CH<sub>4</sub> acumulado en función del tiempo. 15 reactores.

### 5.1.1.2.- Bloque de Ensayos 2.

Los resultados obtenidos en los ensayos del Bloque 2 se muestran en la Tabla 5.2, y sus curvas de biodegradabilidad en la Figura 5.2. Considerando las tendencias mostradas en los resultados del 1, para el Bloque de Ensayos 2 se ha disminuido la dosis de levadura (1 y 2% p/v) y aumentado la de metanol (16 y 20 g<sub>DQO</sub>/L<sub>alim</sub>). Con ello se han pretendido incrementar, tanto el rendimiento de eliminación de materia orgánica, como la producción de gas. A su vez, se han probado mezclas conjuntas de levadura y MeOH en la alimentación.

Estos resultados muestran que las concentraciones de levadura estudiadas (1 y 2% p/v) dan lugar a una producción específica de metano parecida (0,213 y 0,233), en ambos casos superior a la de la mezcla de lodo digerido y lodo mixto, y ligeramente mayor en el caso de la mezcla al 2% p/v de levadura. Teniendo en cuenta los resultados de los Bloques de Ensayos 1 y 2, el óptimo de cantidad de levadura a añadir parece encontrarse en torno al 2% p/v. Los rendimientos de eliminación de SV de la levadura (34,82 y 41,09%) también resultan superiores a los del Blanco (27,75%).

Por otra parte, las cantidades de MeOH añadidas también incrementan la producción específica de metano con respecto al Blanco, observándose que el potencial de biometanización de la mezcla lodo mixto y metanol se reduce conforme aumenta el porcentaje de metanol. Tampoco el rendimiento de eliminación de materia orgánica aumenta (18,06% SV elim.) respecto a la combinación de L<sub>dig</sub>+L<sub>mixt</sub> (Blanco), cuyo porcentaje de eliminación es del 27,75%, considerándose 8 g DQO/L<sub>alim</sub> MeOH como la concentración óptima de metanol para adicionar al lodo de la EDAR C (Tabla 5.1).

Las combinaciones con presencia de MeOH, incluidas las combinaciones con mezcla de levadura y MeOH, muestran doble fase de biodegradabilidad, inhibición y recuperación (Figura 5.2), mientras que las alimentadas exclusivamente con levadura, presentan la forma característica de dicho proceso, producción de CH<sub>4</sub> ascendente desde el principio y tendencia asintótica

a partir del día 15, aproximadamente. La presencia de levadura en las combinaciones donde también se alimenta con MeOH no mejora el proceso ni tampoco la biodegradabilidad de las mezclas. De hecho, y como puede verse en las figuras, en todos los ensayos con presencia de metanol, se produce la inhibición del proceso durante los primeros días del ensayo, mostrándose los valores de producción de biogás por debajo de los correspondientes al blanco, en el trazado en las curvas.

**Tabla 5.2.-** Resultados del Bloque de Ensayos 2. Rendimiento de eliminación de SV, BMP en discontinuo y producción específica de metano.

BLOQUE DE ENSAYOS 2 (EDAR C)							
	Combinaciones	pH inicial	pH final <sup>1</sup>	SV alim. (g)	Rto. elim. SV. (%)	BMP <sup>3</sup> (NL/g <sub>SVaditivos</sub> )± SD	V <sub>CH4</sub> <sup>4</sup> (NL/g <sub>SV alim.</sub> <sup>2</sup> ) ±SD
1	L <sub>dig</sub> C	6,94	7,22	8,64	18,29	0,119 ± 0,000	0,119 ± 0,000
2	Lodo digerido y Lodo mixto	6,07	7,13	9,50	27,75	0,076± 0,002	0,184 ± 0,002
3	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +1 % (p/v) LEVADURA	6,07	7,22	10,45	34,82	0,503 ± 0,004	0,213 ± 0,000
4	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +2 % (p/v) LEVADURA	6,07	7,29	11,41	41,09	0,476 ± 0,023	0,233 ± 0,004
5	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +16 g DQO/L <sub>alim.</sub> <sup>2</sup> MeOH	6,07	7,89	13,77	18,06	0,328 ± 0,033	0,228 ± 0,010
6	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +20 g DQO/L <sub>alim.</sub> <sup>2</sup> MeOH	6,07	6,85	14,83	17,40	0,268 ± 0,002	0,214 ± 0,001
7	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +3 % (p/v) LEVADURA + 12 g DQO/L <sub>alim.</sub> <sup>2</sup> MeOH	6,07	6,95	15,56	31,66	0,140 ± 0,003	0,167 ± 0,001
8	L <sub>dig</sub> +L <sub>mixt</sub> +1 % (p/v) LEVADURA + 12 g DQO/L <sub>alim.</sub> <sup>2</sup> MeOH	6,07	7,11	13,65	26,87	0,271 ± 0,000	0,210 ± 0,000

79

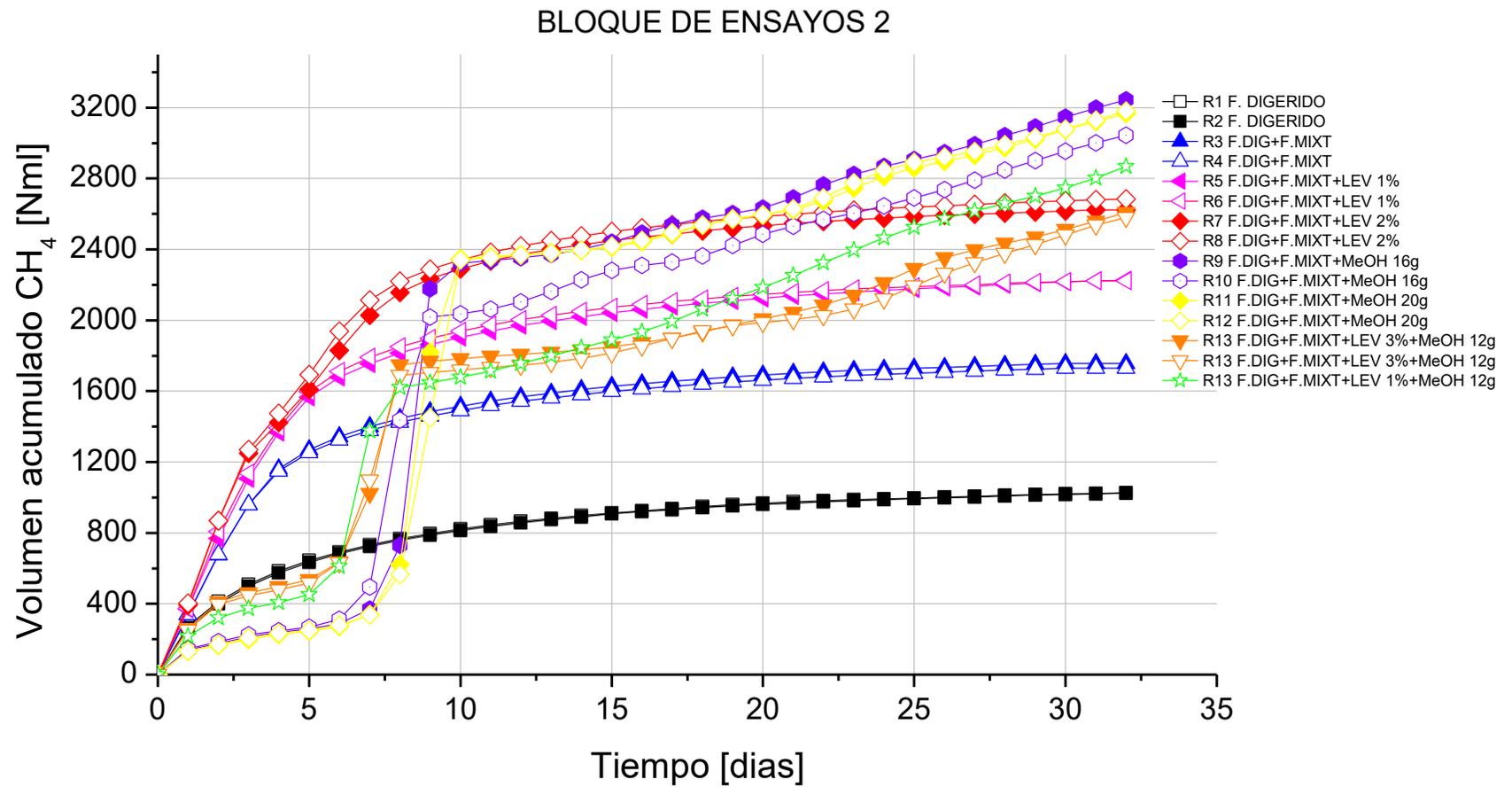
<sup>1</sup>pH promedio en cada combinación.

<sup>2</sup>Cuando se habla de alimentación, L<sub>alim</sub> (litros) se refiere a mezcla de aditivos (levadura o metanol) y lodos (digerido y mixto).

<sup>3</sup>BMP= (V<sub>CH4</sub> total producido – V<sub>CH4</sub> originado por el lodo mixto – V<sub>CH4</sub> originado por el lodo digerido) / g SV aditivos.

<sup>4</sup>V<sub>CH4</sub>= (V<sub>CH4</sub> total producido – V<sub>CH4</sub> originado por el lodo mixto – V<sub>CH4</sub> originado por el lodo digerido) / g SV alimentación.

Todos los lodos utilizados en el Bloque 2 de Ensayos pertenecen a la EDAR C.



**Figura 5.2.-** Bloque de Ensayos 2. Volumen de CH<sub>4</sub> acumulado en función del tiempo. 15 reactores.

### 5.1.1.3.- Bloque de Ensayos 3.

En el Bloque de Ensayos 3, cuyos resultados se encuentran expuestos en la Tabla 5.3 y en la Figura 5.3 se estudiaron tres concentraciones de levadura (0,5; 1 y 2% p/v) y dos de metanol (12 y 16 g<sub>DQO</sub>/L<sub>alim.</sub>) utilizando lodo digerido y lodo mixto de la EDAR B, con las mismas condiciones de operación que en los ensayos anteriores. Igualmente se llevaron a cabo 2 combinaciones con lodo de la EDAR C a concentraciones de levadura de 0,5 y 0,1% p/v, respectivamente.

Los resultados obtenidos en estos ensayos con lodo de la EDAR B y levadura muestran igual que en los ensayos anteriores, el efecto positivo de la adición de levadura. Como puede verse en la Tabla 5.3, los valores de producción específica de metano aumentan conforme aumenta la concentración de levadura, siendo esta producción siempre mayor que la del lodo mixto. En el caso del lodo de C, gráficas R14 y R15, Figura 5.3, la adición de levadura al 0,1 y 0,5%, apenas supone mejora sobre el Blanco, gráfica R1. De hecho, la combinación con el 0,1% de levadura (0,193 NL/g<sub>sv</sub>) da un valor de producción específica ligeramente inferior al de la mezcla base (Blanco), ensayo R3 (0,201 NL/g<sub>sv</sub>). Comparados estos ensayos con los del Bloque 2 anterior, tanto para el lodo de C, como para el de B, la combinación al 2% de levadura es la que ofrece los mejores resultados

Como puede verse, también la adición de MeOH al lodo de B mejora notablemente las producciones de metano respecto a la mezcla L<sub>dig</sub>+L<sub>mixt</sub>. Sus curvas de biodegradabilidad, Figura 5.3, presentan comportamiento en dos fases de producción, tal y como sucedía en los Bloques de Ensayos 1 y 2, aunque con una pendiente suavizada en la primera parte de la misma. En el rango aquí estudiado, también la producción de metano se incrementa conforme lo hace la proporción de MeOH con respecto a la del Blanco. Considerando los resultados de los tres bloques de ensayos, la cantidad óptima de MeOH parece estar en el entorno de 16 g<sub>DQO</sub>/L<sub>alim.</sub> para el lodo de la EDAR B y 8 g<sub>DQO</sub>/L<sub>alim.</sub> para la EDAR C.

En este Bloque 3, como puede verse revisando las Tablas 5.1, 2 y 3, con los lodos en la EDAR B, se han obtenido los mejores resultados de los medidos, con referencia a los potenciales de biometanización en discontinuo alcanzados. Como puede verse estos datos se han presentado en función de los  $g_{SV}$  del aditivo utilizado.

Tras el análisis de todos estos ensayos, se podría concluir que dentro del rango de concentración 1-3%(p/v) y para los lodos de ambas EDAR, la producción de biogás se incrementa aproximadamente de forma lineal conforme aumenta la proporción de levadura en la mezcla a digerir. Por ello, en lo que a la producción específica de metano y potencial de metanización se refiere, se considera entre el 2 y 3% (p/v) de levadura como la mezcla óptima de todas las estudiadas. En relación al metanol, aunque se han observado incrementos significativos en la producción específica de biogás, y calculado valores elevados de potencial de biometanización en discontinuo, especialmente en el caso de B, su posible adición al digestor no se considera recomendable debido a que, como se ha podido comprobar, a determinadas concentraciones puede inhibir el proceso de digestión como ocurre en los Bloques de ensayos 2, combinaciones 5 y 6 (Tabla 5.2).

**Tabla 5.3.-** Resultados del Bloque de Ensayos 3. Rendimiento de eliminación de SV, BMP en discontinuo y producción específica de metano.

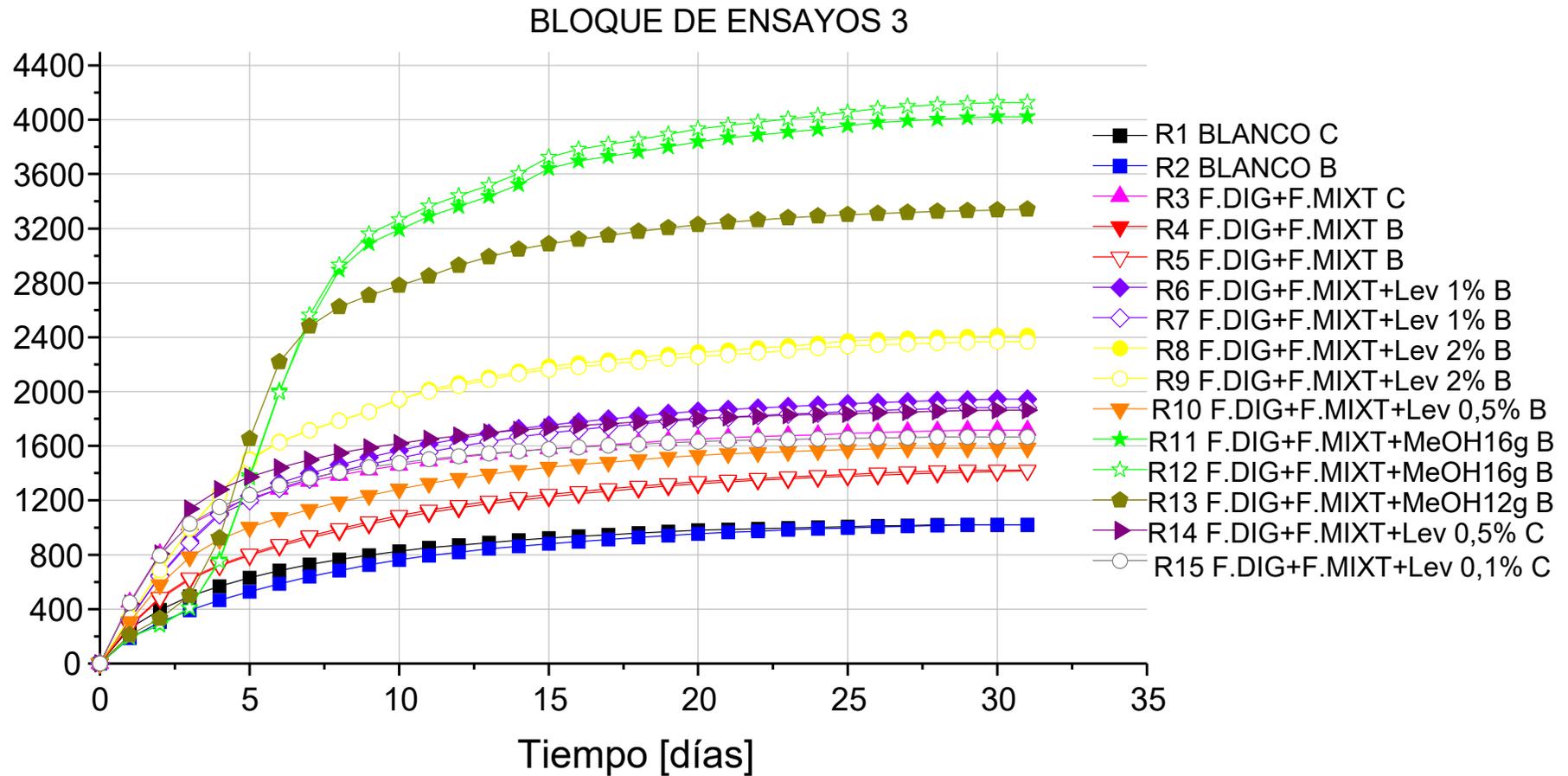
<b>BLOQUE DE ENSAYOS 3 (EDAR C y B)</b>							
	<b>Combinaciones</b>	<b>pH inicial</b>	<b>pH final<sup>1</sup></b>	<b>SV alim. (g)</b>	<b>Rto. elim. SV (%)</b>	<b>BMP<sup>3</sup> (NL/g SV aditivos) ±SD</b>	<b>V<sub>CH4</sub><sup>4</sup> (NL/g SV alim.) ±SD</b>
1	L <sub>dig</sub> C	6,94	7,21	7,68	14,06	0,133 ± 0,000	0,133 ± 0,000
2	L <sub>dig</sub> B	7,07	7,34	8,91	29,04	0,115 ± 0,000	0,115 ± 0,000
3	L <sub>dig</sub> C + L <sub>mixt</sub> C	7,43	7,26	8,54	37,55	0,245 ± 0,000	0,201 ± 0,000
4	L <sub>dig</sub> B + L <sub>mixt</sub> B	8,17	7,36	9,74	33,76	0,123 ± 0,002	0,146 ± 0,001
5	L <sub>dig</sub> B + L <sub>mixt</sub> B + 1% (p/v) LEVADURA	8,17	7,35	10,69	44,01	0,516 ± 0,048	0,179 ± 0,004
6	L <sub>dig</sub> B + L <sub>mixt</sub> B + 2% (p/v) LEVADURA	8,17	7,37	11,65	44,85	0,508 ± 0,015	0,205 ± 0,002
7	L <sub>dig</sub> B + L <sub>mixt</sub> B + 0,5% (p/v) LEVADURA	8,17	7,40	10,22	40,00	0,343 ± 0,000	0,155 ± 0,000
8	L <sub>dig</sub> B + L <sub>mixt</sub> B + 16 g DQO/L <sub>alim.</sub> <sup>2</sup> MeOH	8,17	7,31	14,01	60,37	0,622 ± 0,018	0,291 ± 0,005
9	L <sub>dig</sub> B + L <sub>mixt</sub> B + 12 g DQO/L <sub>alim.</sub> <sup>2</sup> MeOH	8,17	7,20	12,94	61,54	0,601 ± 0,000	0,258 ± 0,000
10	L <sub>dig</sub> C + L <sub>mixt</sub> C + 0,5% (p/v) LEVADURA	7,43	7,24	9,01	47,72	0,311 ± 0,000	0,207 ± 0,000
11	L <sub>dig</sub> C + L <sub>mixt</sub> C + 0,1% (p/v) LEVADURA	7,43	7,25	8,63	37,55	<0,000 ± 0,000	0,193 ± 0,000

<sup>1</sup>pH promedio en cada combinación.

<sup>2</sup>Cuando se habla de alimentación, L<sub>alim</sub> (litros) se refiere a mezcla de aditivos (levadura y metanol) y lodos (digerido y mixto).

<sup>3</sup>BMP= (V<sub>CH4</sub> total producido - V<sub>CH4</sub> originado por el lodo mixto - V<sub>CH4</sub> originado por el lodo digerido) / g SV aditivos.

<sup>4</sup>V<sub>CH4</sub> = (V<sub>CH4</sub> total producido - V<sub>CH4</sub> originado por el lodo mixto - V<sub>CH4</sub> originado por el lodo digerido) / g SV alimentación.



**Figura 5.3.-** Bloque de Ensayos 3. Volumen de  $\text{CH}_4$  acumulado en función del tiempo. 15 reactores.

\*R1 Blanco C se refiere a lodo digerido de la EDAR C.

\*R2 Blanco B se refiere a lodo digerido de la EDAR B.

#### 5.1.1.4.- Balance y simulación de costes.

Los componentes utilizados en los ensayos de medida del potencial de biometanización en discontinuo fueron: lodo digerido y lodo mixto procedente de las EDAR C y B, y como aditivos, se adicionaron levadura y metanol. La elección de uno o varios aditivos para las pruebas que se harán en semicontinuo será considerada más adelante.

Entre los dos aditivos estudiados en los distintos bloques de ensayos de la EDAR C, se ha observado que la levadura, debido a su elevado potencial de biometanización en discontinuo y biodegradabilidad, es un aditivo apropiado para el crecimiento y proliferación de las bacterias productoras de metano. El metanol es un producto también con posibilidades de ser utilizado en los digestores, siendo incluso su potencial de metanización superior al de la levadura cuando se usa lodo de B. Sin embargo, como ya se ha visto, su curva de biodegradabilidad refleja que por encima de unas determinadas concentraciones puede conducir a la inhibición del proceso de digestión.

A continuación, se exponen resultados de una simulación realizada con un programa Excel que maneja datos de la planta real y los obtenidos en esta investigación con lo que se analiza el resultado de la adición de ambos aditivos en los digestores de las EDAR C y B y se estudian los balances de masas del proceso de digestión, teniendo también presente los costes asociados a dichos procesos.

En las Tablas 5.4 y 5.5 se recogen los datos de simulación obtenidos para el proceso de digestión de ambas EDAR, utilizando en la alimentación, tanto levadura, como MeOH, a las concentraciones consideradas como mejores en los rangos estudiados. Los parámetros utilizados para la realización de las simulaciones son fijados considerando costes reales de operación de cada EDAR, los valores representativos obtenidos con la medida del potencial de biometanización, así como de la reducción de materia volátil.

Los datos operacionales más relevantes tenidos en cuenta en las simulaciones son: caudal de entrada, concentración de ST y SV, tanto en la entrada como en la salida del digestor, rendimientos de eliminación de materia orgánica, consumo eléctrico de la EDAR (aproximado), valorización del biogás generado en grupos generadores para autoconsumo de electricidad producida, coste asociado a la gestión de los lodos generados tras la deshidratación, coste de los aditivos, etc. El coste de los aditivos y el coste de gestión de lodos son parámetros clave a la hora de elegir un determinado tipo de aditivo, ya que de ellos depende notablemente el coste del proceso real.

Los resultados obtenidos en la simulación de la EDAR C, Tabla 5.4 (ver también en los Anexos Tablas A.1.1, A.1.2, A.1.3, A.1.4, A.1.5, A.1.6), indican que se conseguiría ahorro en el proceso, con respecto a la operación actual, si el precio a pagar por la levadura para igualar los costes fuese inferior a 44,90 €/Tm en el caso de adicionar 1% p/v de levadura; 31,30 €/Tm para 2% p/v y 27,6 €/Tm en el caso de 3% p/v. Por encima de estos precios y condiciones, el proceso no supondría ventajas en coste con respecto a la situación actual.

En la EDAR B, Tabla 5.5 (ver también en los Anexos Tablas A.1.7, A.1.8, A.1.9, A.1.10, A.1.11) el precio máximo que se podría llegar a pagar para que la adición de levadura se igualara al coste de tratamiento actual sería de 35,80 y 28,60 €/Tm para 1, y 2 % de levadura, respectivamente.

Al mismo tiempo, hay que tener presente la disposición de levadura en las proximidades de la EDAR y sus características físicas. La levadura empleada en esta experimentación ha sido adquirida con consistencia sólida-húmeda (levadura de panadería al 30% de materia seca, aproximadamente), mientras que su presentación comercial es normalmente líquida (15% materia seca). Para la realización de las simulaciones se han considerado las cantidades necesarias de levadura comercial al 15%. Su precio como producto en el mercado para alimentación animal es elevado (65 €/Tm), aunque se podría adquirir con menor calidad a un precio más bajo, cuando esta se tipifica como residuo, por ejemplo, de la industria cervecera. Se ha consultado a diversas cerveceras españolas:

Estrella Levante, Heineken, etc. con el resultado de que las levaduras se venden para la fabricación de piensos y el precio actual para los mismos se encuentra alrededor de los 50 €/Tm por lo que tampoco sería útil a la vista de los resultados obtenidos en la simulación.

A diferencia del caso de la levadura, donde el comportamiento del lodo de ambas EDAR, B y C es muy parecido, obteniéndose potenciales de biometanización semejantes; en el caso de la adición de metanol existen diferencias significativas, y, por tanto, en los resultados de cada simulación que se ha realizado. En el caso de la EDAR C, Tabla 5.4 (ver también Tablas A.1.1, A.1.2, A.1.3, A.1.4, A.1.5, A.1.6) la adición de metanol no resulta económica, puesto que el precio máximo al que se podría comprar el producto para no incrementar los costes con respecto a la operación sin aditivos sería de 114,2 €/Tm para la dosis de 16 g<sub>DQO</sub>/L<sub>alim.</sub> de metanol y 60,40 €/Tm para 12 g<sub>DQO</sub>/L<sub>alim.</sub>, siendo el precio actual del metanol a granel de 350 €/Tm, aproximadamente. En la EDAR B, Tabla 5.5 (ver también Tablas A.1.7, A.1.8, A.1.9, A.1.10, A.1.11 de los Anexos) los costes de adquisición de metanol podrían ser como máximo de 154,4 €/Tm y 107,5 €/ Tm para 12 g<sub>DQO</sub>/L<sub>alim.</sub> y 16 g<sub>DQO</sub>/L<sub>alim.</sub>, respectivamente.

A la vista de los resultados obtenidos en estas simulaciones de costes, la adición de levadura en el proceso de digestión anaerobia, aparece como la opción con mayores posibilidades económicas, frente a la del metanol, debido fundamentalmente a su alto precio. Además, las curvas obtenidas en estos ensayos en discontinuo correspondientes al metanol indican, como ya se ha reiterado, inhibición del sistema en los primeros días de los ensayos.

**Tabla 5.4.-** Tabla de costes/beneficios de la operación en la EDAR C, utilizando los aditivos y concentraciones antes seleccionados.

Definición variable	Símb.	Uds.	Lodo mixto (Ver Tabla A.1.1)	Lodo mixto + Lev (3%) (Ver Tabla A.1.2)	Lodo mixto + MeOH (12 g/l) (Ver Tabla A.1.3)	Lodo mixto + Lev (1%) (Ver Tabla A.1.4)	Lodo mixto + Lev (2%) (Ver Tabla A.1.5)	Lodo mixto + MeOH (16 g/l) (Ver Tabla A.1.6)
Caudal de agua residual tratado en EDAR	$Q_A^1$	m <sup>3</sup> /día	25.852	25.852	25.852	25.852	25.852	25.852
Caudal másico de lodo a digestión	$M_1^2$	kg/día	150.000	150.000	150.000	150.000	150.000	150.000
Caudal másico de aditivo	$M_2^3$	kg/día	NA	4.500	1.200	1.500	3.000	1.600
% Reducción de SV en digestión	%R <sub>SV</sub> <sup>4</sup>	%	36	45	40	45	45	40
Tiempo retención hidráulico en digestión	TRH <sup>5</sup>	Días	23,31	22,6	23,1	23,1	22,9	23
Producción diaria de biogás	$V_{gas}^6$	Nm <sup>3</sup> /día	1.454	2.169	1.931	1.611	1.890	2.130
Energía eléctrica generada en cogeneración	$E_{elec,cog}^7$	kWh/día	5.908	8.814	7.847	6.549	7.681	8657
Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}^8$	€/día	717	798	810	705	752	849
Coste consumo eléctrico (con autoconsumo)	$C_{cons,elec}^9$	€/día	522	246	291	461	353	261
Coste por unidad de tratamiento	$C_{TOTAL}^{10}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
Precio de compra máximo del aditivo <sup>10</sup>	$C_{residuo\ máx.}^{11}$	€/Tm	NA	27,6	60,4	44,9	31,3	114,2

<sup>1</sup>  $Q_A$ : Caudal de agua residual que entra a la EDAR.

<sup>2</sup>  $M_1$ : Caudal de lodos que entra al digestor.

<sup>3</sup>  $M_2$ : Caudal de aditivo.

<sup>4</sup> %R<sub>SV</sub>: En los digestores, el %SV que se reduce por la digestión anaerobia.

<sup>5</sup> TRH: Tiempo de Retención Hidráulica.

<sup>6</sup>  $V_{gas}$ : El biogás que se genera al día.

<sup>7</sup>  $E_{elec,cog}$  = (Potencia Instalada en la planta \* Horas funcionamiento)/día.

<sup>8</sup>  $C_{gest,lodo}$  = Cantidad lodos (Kg) \* Precio Gestión/kg.

<sup>9</sup>  $C_{cons,elec}$  = Consumo eléctrico neto EDAR \* Precio energía eléctrica medio. (Considerando que por lo menos, la mitad de la demanda de energía eléctrica es cubierta con la cogeneración, se puede ajustar el consumo para usar la electricidad de la red en las horas más baratas).

<sup>10</sup>  $C_{TOTAL}$  =  $C_{gest,lodo}$  +  $C_{cons,elec}$  +  $C_{trans}$  +  $C_{amortización}$  (Precio de la levadura 65 €/Tm, Precio del metanol 350 €/Tm) = El coste por metro cúbico de agua residual tratada.

<sup>11</sup>  $C_{residuo\ máx.}$  = Coste máximo a pagar por los aditivos para que el proceso fuera más barato que sin ellos.

**Tabla 5.5.-** Tabla de costes/beneficios de la operación en la EDAR B, utilizando los aditivos y concentraciones antes seleccionados.

Definición variable	Símb.	Uds.	Lodo mixto (Ver Tabla A.1.7)	Lodo mixto + Lev (1%) (Ver Tabla A.1.8)	Lodo mixto + Lev (2%) (Ver Tabla A.1.9)	Lodo mixto + MeOH (16g/l) (Ver Tabla A.1.10)	Lodo mixto + MeOH (12g/l) (Ver Tabla A.1.11)
Caudal agua residual tratado EDAR	Q <sub>A</sub> <sup>1</sup>	m <sup>3</sup> /día	78.500	78.500	78.500	78.500	78.500
Caudal másico lodo a digestión	M <sub>1</sub> <sup>2</sup>	kg/día	350.000	350.000	350.000	350.000	350.000
Caudal másico aditivo a digestión	M <sub>2</sub> <sup>3</sup>	kg/día	-	3.500	7.000	3.733	2.800
% Reducción SV en digestión	%R <sub>SV</sub> <sup>4</sup>	%	45	50	50	50	50
Tiempo retención hidráulico en digestión	TRH <sup>5</sup>	Días	17,4	17,3	17,1	17,2	17,3
Producción diaria biogás	V <sub>gas</sub> <sup>6</sup>	Nm <sup>3</sup> /día	3.381	4.056	4.732	6.890	6.013
Energía eléctrica generada en cogeneración	E <sub>elec,cog</sub> <sup>7</sup>	kWh/día	20.610	24.727	28.845	42.000	36.654
Coste gestión lodos	C <sub>gest,lodo</sub> <sup>8</sup>	€/día	2.594	2.620	2.788	2.956	2.830
Coste consumo eléctrico (con autoconsumo)	C <sub>cons,elec</sub> <sup>9</sup>	€/día	1.557	1.160	775	0	33
Coste por unidad de tratamiento	C <sub>TOTAL</sub> <sup>10</sup>	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053
Coste compra máximo aditivo	C <sub>residuo máx.</sub> <sup>11</sup>	€/Tm	-	35,8	28,6	107,5	154,4

<sup>1</sup> Q<sub>A</sub>: Caudal de agua residual que entra a la EDAR.

<sup>2</sup> M<sub>1</sub>: Caudal de lodos que entra al digestor.

<sup>3</sup> M<sub>2</sub>: Caudal de aditivo.

<sup>4</sup> %R<sub>SV</sub>: En los digestores, el %SV que se reduce por la digestión anaerobia.

<sup>5</sup> TRH: Tiempo de Retención Hidráulica.

<sup>6</sup> V<sub>gas</sub>: El biogás que se genera al día.

<sup>7</sup> E<sub>elect,cog</sub> = (Potencia Instalada en la planta \* Horas funcionamiento)/día.

<sup>8</sup> C<sub>gest,lodo</sub> = Cantidad lodos \* Precio Gestión/kg.

<sup>9</sup> C<sub>cons,elec</sub> = Consumo eléctrico neto EDAR \* Precio energía eléctrica medio. (Considerando que por lo menos, la mitad de la demanda de energía eléctrica es cubierta con la cogeneración, se puede ajustar el cosumo para usar la electricidad de la red en las horas más baratas).

<sup>10</sup> C<sub>TOTAL</sub> = C<sub>gest,lodo</sub> + C<sub>cons,elec</sub> + C<sub>trans</sub> + C<sub>amortización</sub> (Precio de la levadura 65 €/Tm, Precio del metanol 350 €/Tm) = El coste por metro cúbico de agua residual tratada.

<sup>11</sup> C<sub>residuo máx.</sub> = Coste máximo a pagar por los aditivos para que el proceso fuera más barato que sin ellos.

### 5.1.2.- Estudio del proceso de digestión anaerobia en semicontinuo con levadura.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de co-digestión en semicontinuo a escala piloto con lodos de la EDAR B y levadura, así como el análisis de los mismos.

#### 5.1.2.1.- Producción de biogás.

La producción volumétrica diaria de biogás en ambos reactores se ha representado en la Figura 5.4. El volumen de alimentación de lodo para ambos digestores se mantiene constante en 500 ml en días laborales y 750 ml en el fin de semana, independientemente de las variaciones de la carga de levadura alimentada, con el objeto de mantener el tiempo de residencia en la digestión. Las cantidades alimentadas de levadura son el 2% y el 3%, referidos al peso de la alimentación de lodo mixto.

Analizando los resultados obtenidos se observa, en primer lugar, una mayor producción de biogás por parte del digestor alimentado además con levadura en comparación con el digestor alimentado únicamente con lodo durante todo el ensayo. El volumen diario de biogás producido en el digestor blanco se mantiene casi constante a lo largo del ensayo (1,5-2,5 L/día) con excepción del descenso brusco producido durante los días 19-20 (Figura 5.4), por el estado del lodo mixto, debido a su baja carga en sólidos volátiles en esos días.

La Figura 5.5 muestra el volumen de biogás acumulado medido en cada uno de los dos digestores (observándose mayor producción de biogás en el ensayo con levadura). También se observa en el ensayo con levadura que la pendiente para el intervalo comprendido entre el día 5 y el 20 (adición de 2% de levadura) es inferior que la correspondiente al intervalo comprendido entre el día 20 y el 33 (adición de 3% de levadura). El porcentaje de CH<sub>4</sub> es similar en ambos digestores (alrededor del 60%).

Un análisis detallado de los datos de producción de biogás se presenta en la Tabla 5.6. Los resultados muestran que la mayor producción diaria de biogás corresponde a las semanas 4 y 5 de ensayo, cuando se ha alimentado el digestor ensayo con un 3% p/v<sub>alim.</sub> de levadura. Durante dichas semanas, la producción de biogás, respecto a la cantidad de materia orgánica alimentada en el digestor ensayo, osciló entre 0,36-0,47 L<sub>biogás</sub>/g<sub>SV alim.</sub>. Para el ensayo operando con solo lodo, para el mismo periodo, la producción oscila entre 0,17 y 0,20 L<sub>biogás</sub>/g<sub>SV alim.</sub>. En este periodo, el incremento de carga orgánica promedio que supone la adición de levadura al lodo mixto, con respecto a la carga del ensayo blanco, es de aproximadamente un 35%, lo que a su vez conlleva un incremento en la producción de biogás con respecto a los SV alimentados de aproximadamente un 100%.

Esta diferencia observada entre los rendimientos de producción de biogás de los dos procesos estudiados es debida, tanto a la diferencia en las cargas orgánicas de los mismos, como al posible incremento en el potencial de biometanización en discontinuo por la adición de la levadura (un aditivo válido como mejora del rendimiento de producción de biogás).

En la Tabla 5.6 se puede observar cómo en los valores promedio para las semanas S4 + S5 hay un mayor rendimiento específico de producción de biogás en el caso de la mezcla con levadura (0,69 L<sub>biogás</sub>/g<sub>SV elim</sub>) que en el de lodo sin aditivo (0,55 L<sub>biogás</sub>/g<sub>SV elim</sub>). Esto confirma el efecto positivo sobre la producción de biogás que tiene la adición de levadura al lodo mixto.

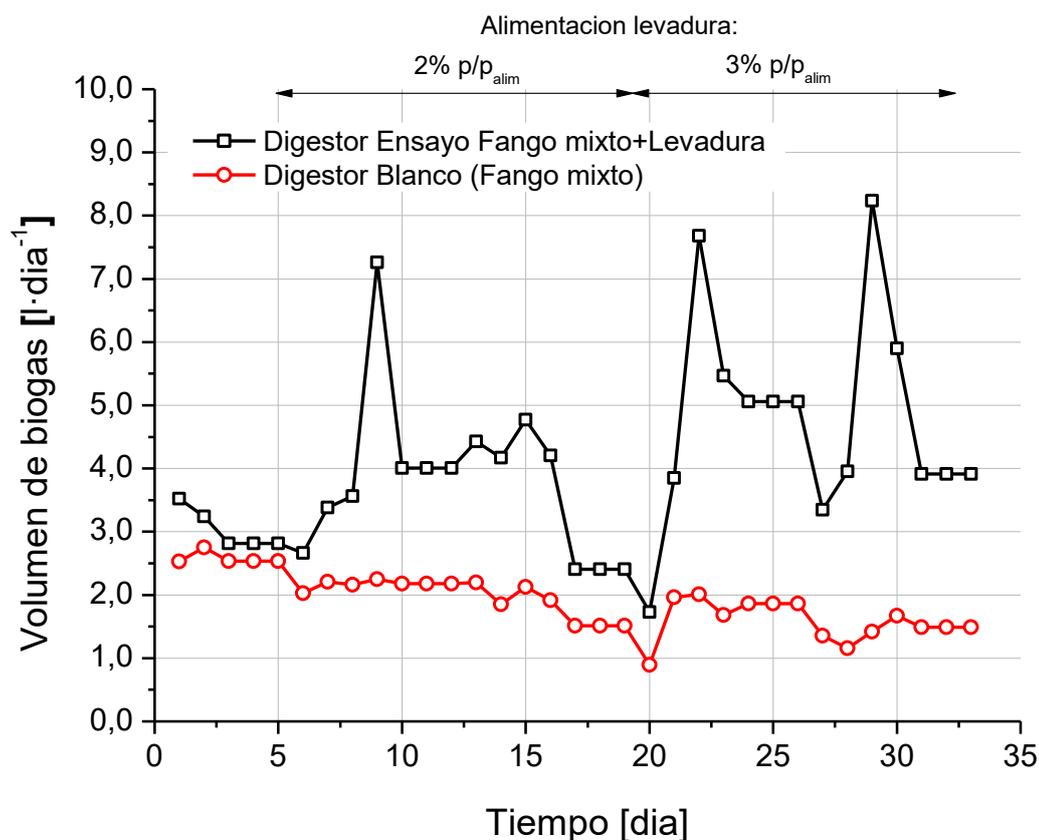
**Tabla 5.6.-** Datos promedio de producción de biogás obtenidos en los digestores alimentados con lodo mixto y lodo mixto + levadura, por semanas.

Semanas		S 1	S 2	S 3	S 4	S 5	S2 + S3	S4 + S5
		Lev 2%	Lev 2%	Lev 2%	Lev 3%	Lev 3%	Lev 2%	Lev 3%
Reactor		Prom.	Prom.	Prom.	Prom.	Prom.	Prom.	Prom.
<b>Carga SV</b> (g <sub>sv</sub> /L <sub>alim</sub> ·día)	L <sub>mixt</sub> +Lev	1,47	1,68	1,08	1,48	1,20	1,40	1,35
	L <sub>mixt</sub>	1,47	1,53	0,82	1,12	0,88	1,20	1,01
<b>Producción biogás diaria</b> (L/día)	L <sub>mixt</sub> +Lev	3,10	3,96	3,54	4,84	4,88	3,77	4,86
	L <sub>mixt</sub>	2,59	2,22	1,80	1,74	1,43	2,02	1,59
<b>Volumen biogás acumulado</b> (L)	L <sub>mixt</sub> +Lev	8,06	28,93	59,96	86,85	119,81	43,41	102,06
	L <sub>mixt</sub>	6,50	20,43	35,77	47,27	57,69	27,59	52,08
<b>Producción biogás</b> (L <sub>gas</sub> /g <sub>sv</sub> alim.)	L <sub>mixt</sub> +Lev	0,31	0,27	0,34	0,36	0,47	0,30	0,41
	L <sub>mixt</sub>	0,27	0,16	0,23	0,17	0,20	0,19	0,18
<b>Producción biogás</b> (L <sub>gas</sub> /g <sub>sv</sub> elim.)	L <sub>mixt</sub> +Lev	0,67	0,48	0,73	0,65	0,73	0,60	0,69
	L <sub>mixt</sub>	0,54	0,33	0,98	0,45	0,66	0,63	0,55
<b>Producción biogás</b> (L/L <sub>alim</sub> ·día)	L <sub>mixt</sub> +Lev	0,31	0,40	0,35	0,48	0,49	0,38	0,49
	L <sub>mixt</sub>	0,26	0,22	0,18	0,17	0,14	0,20	0,16

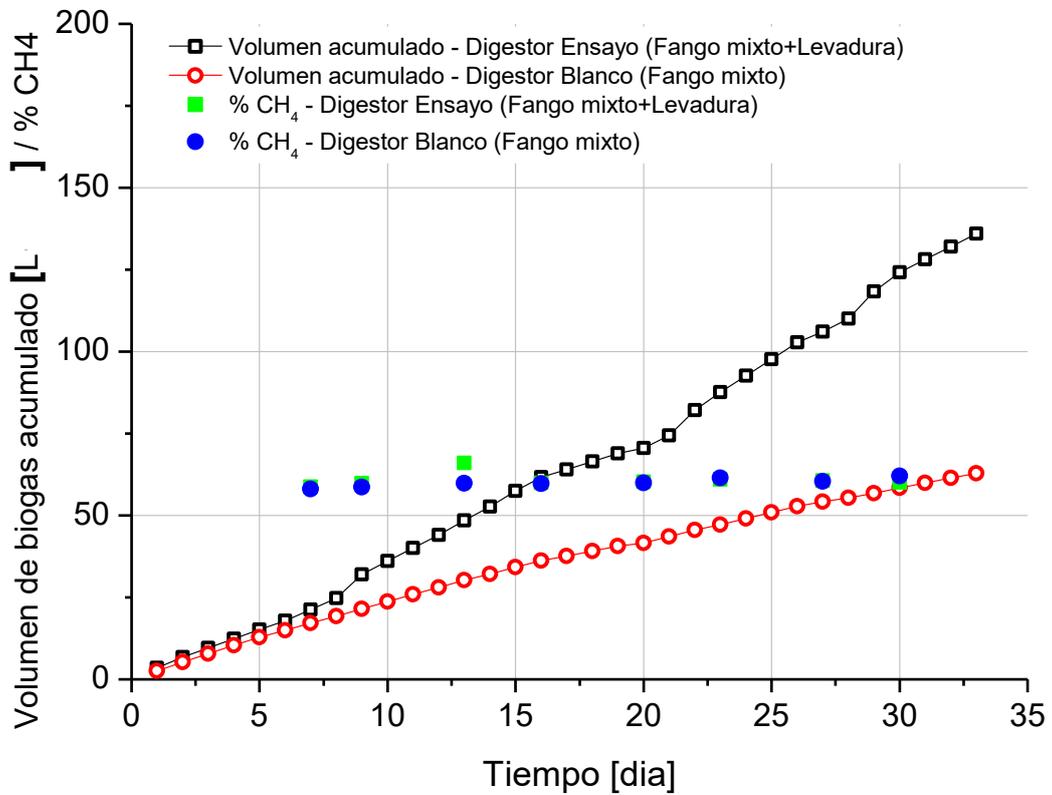
En las Figuras 5.6 y 5.7 se muestran los valores obtenidos del volumen de biogás producido en función de la cantidad de SV presentes en la alimentación y cantidad de SV eliminados, respectivamente, apreciando también un incremento de producción de biogás en función de SV<sub>elim.</sub> en ambos reactores durante los días 15-20 del ensayo.

La composición del biogás generado se observa en la Figura 5.8, donde se representan los porcentajes de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y otros (H<sub>2</sub>, compuestos

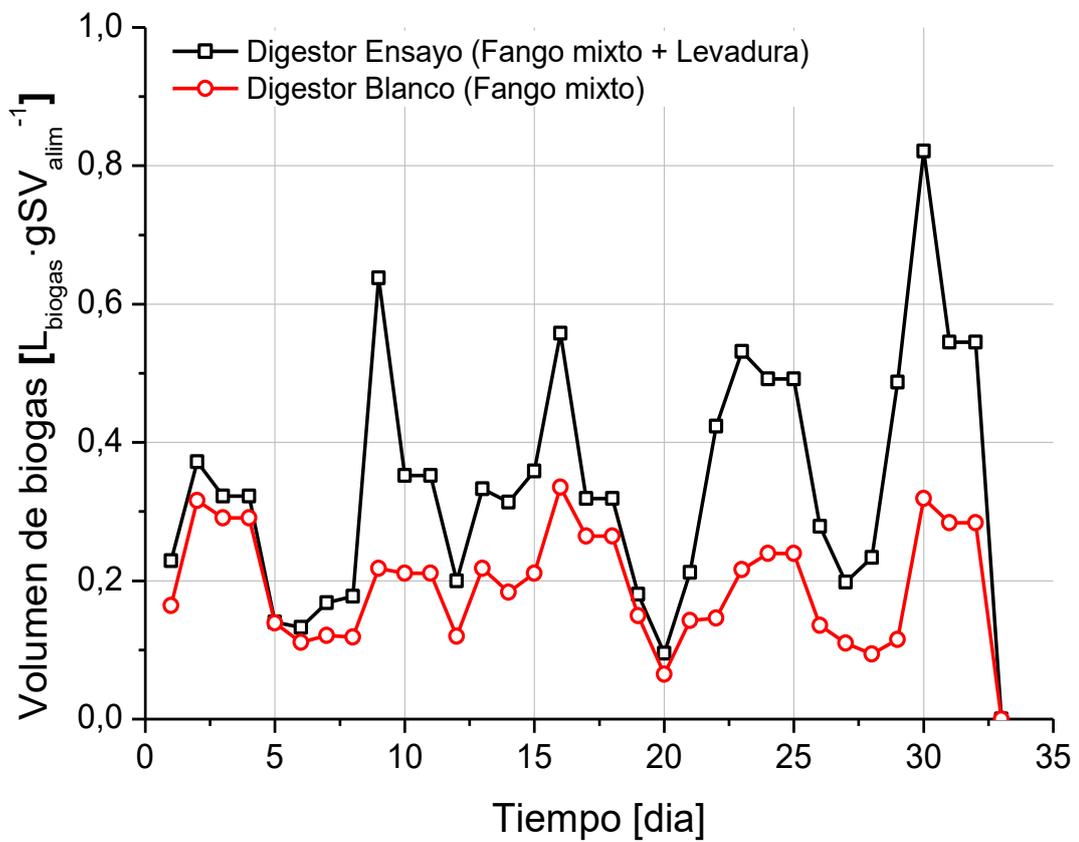
organosulfurados, siloxanos, etc.) y la concentración en ppm de SH<sub>2</sub>. Como se puede ver, hay un promedio de concentración de metano del 60% y una concentración de SH<sub>2</sub> inferior a 500 ppm durante las dos últimas semanas de operación en ambos digestores. La adición de levadura no modifica la composición del biogás generado, excepto el SH<sub>2</sub>, pero no afecta negativamente al proceso.



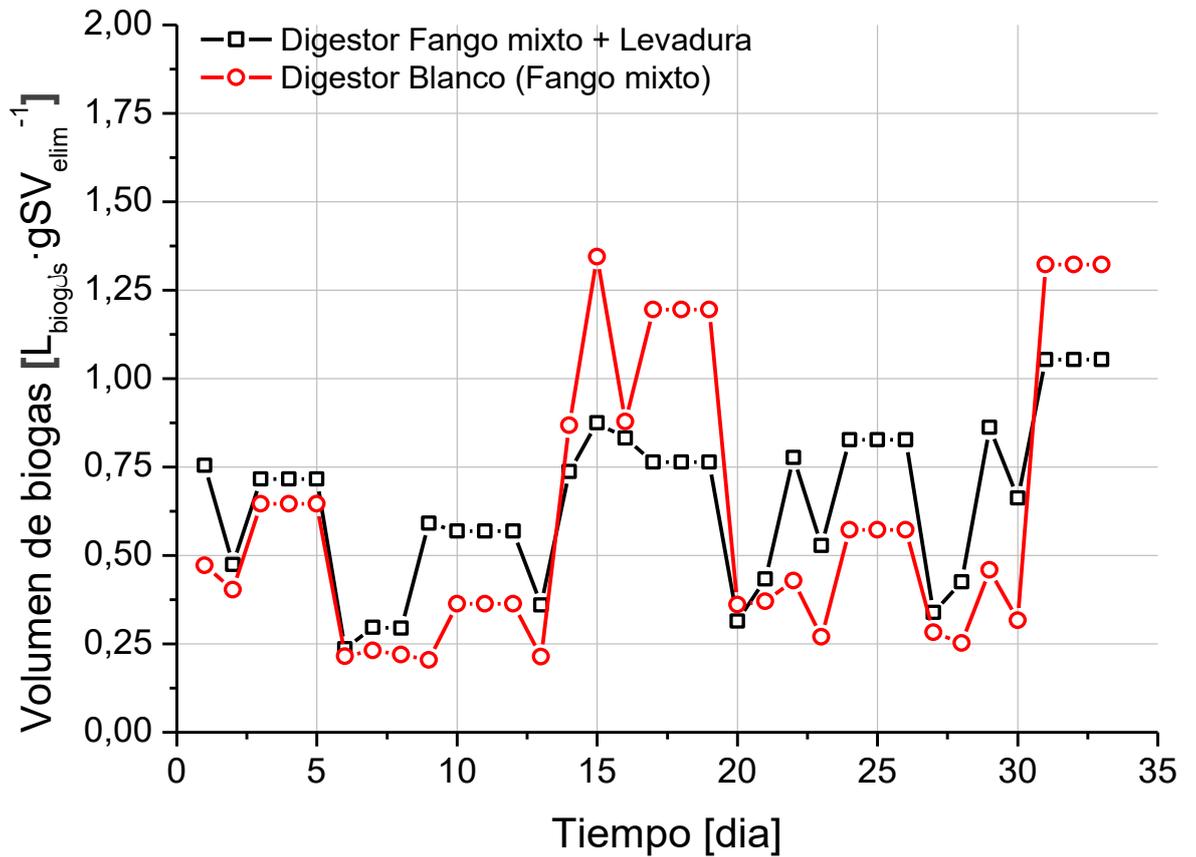
**Figura 5.4.-** Producción diaria volumétrica de biogás de los digestores alimentados con fango (lodo) mixto y fango (Lodo) mixto + levadura.



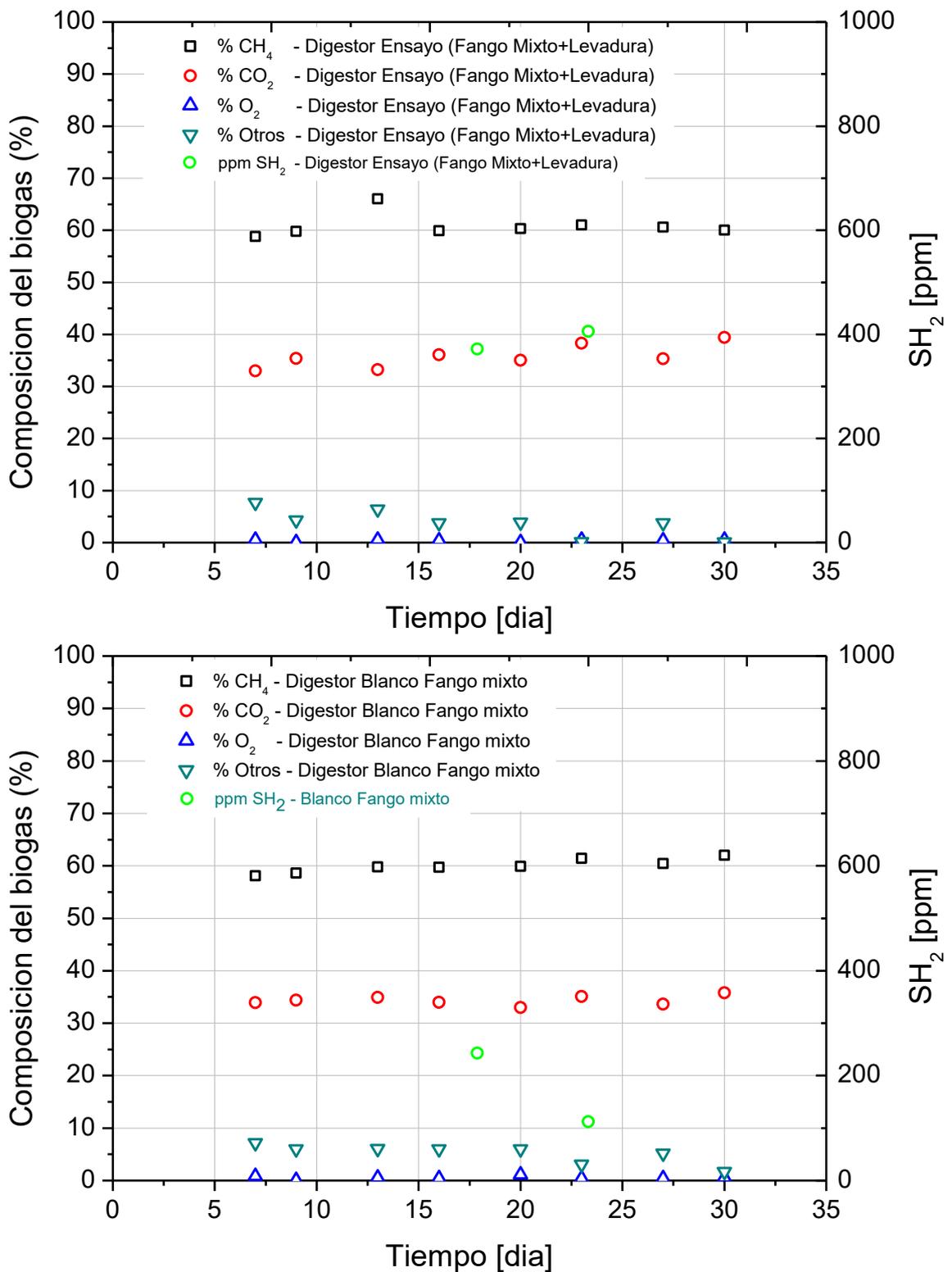
**Figura 5.5.-** Volumen de biogás acumulado y % en riqueza de CH<sub>4</sub> en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2%, y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.



**Figura 5.6.-** Volumen de biogás producido cada día por gramo de SV alimentado en los digestores operados con fango mixto y fango mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2%, y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.



**Figura 5.7.-** Volumen de biogás producido cada día por gramo de SV eliminado en los digestores operados con fango mixto y fango mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2%, y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.



**Figura 5.8.-** Composición del biogás (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, SH<sub>2</sub> y otros) en los digestores alimentados con fango mixto (abajo) y fango mixto + levadura (arriba). Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2%, y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.

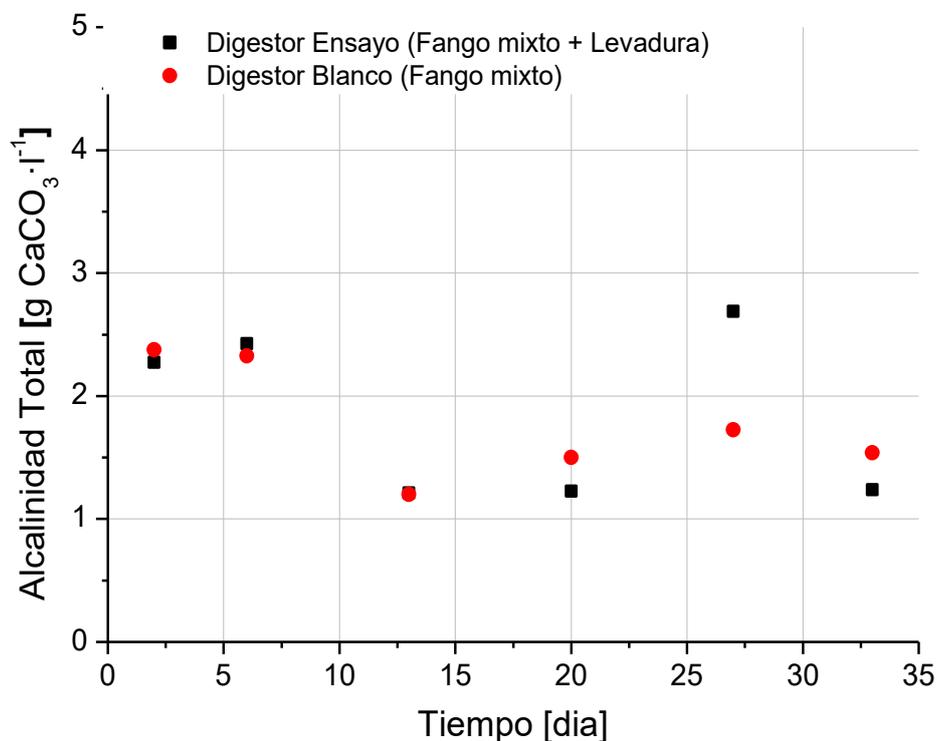
### 5.1.2.2.- Parámetros de control.

#### a) Alcalinidad total.

La mayor parte de la alcalinidad del lodo digerido está formada por bicarbonato amónico, consecuencia de la combinación del amoníaco con el dióxido de carbono, producido en la etapa de fermentación ácida.

En el rango de pH del proceso de digestión anaerobia, valores superiores a 2,50  $\text{g}_{\text{CaCO}_3}/\text{L}$  aseguran un buen control del pH y una adecuada estabilidad del sistema. En los análisis realizados para la caracterización de los componentes de alimentación se encuentran valores de alcalinidad total en un rango de 0,21- 0,65  $\text{g}_{\text{CaCO}_3}/\text{L}$  para los diferentes lotes de lodo mixto procedente de la EDAR C. El lodo digerido añadido al comienzo del ensayo mostraba una alcalinidad total de 1,85  $\text{g}_{\text{CaCO}_3}/\text{L}$ .

En la Figura 5.9 se representan los valores de alcalinidad obtenidos en el lodo digerido de ambos digestores. En el digestor considerado como blanco, la adición diaria de lodo mixto da lugar a valores de alcalinidad entre 1 y 2,5  $\text{g}_{\text{CaCO}_3}/\text{L}$ , aproximadamente. En el digestor ensayo (con adiciones diarias de levadura), los valores de alcalinidad se sitúan en el rango aproximado de 1 y 3  $\text{g}_{\text{CaCO}_3}/\text{L}$ , valores del mismo orden que los obtenidos en el lodo del digestor blanco. Dichos valores son ligeramente inferiores al valor óptimo reflejado en la bibliografía (2,5  $\text{g}_{\text{CaCO}_3}/\text{L}$ ).

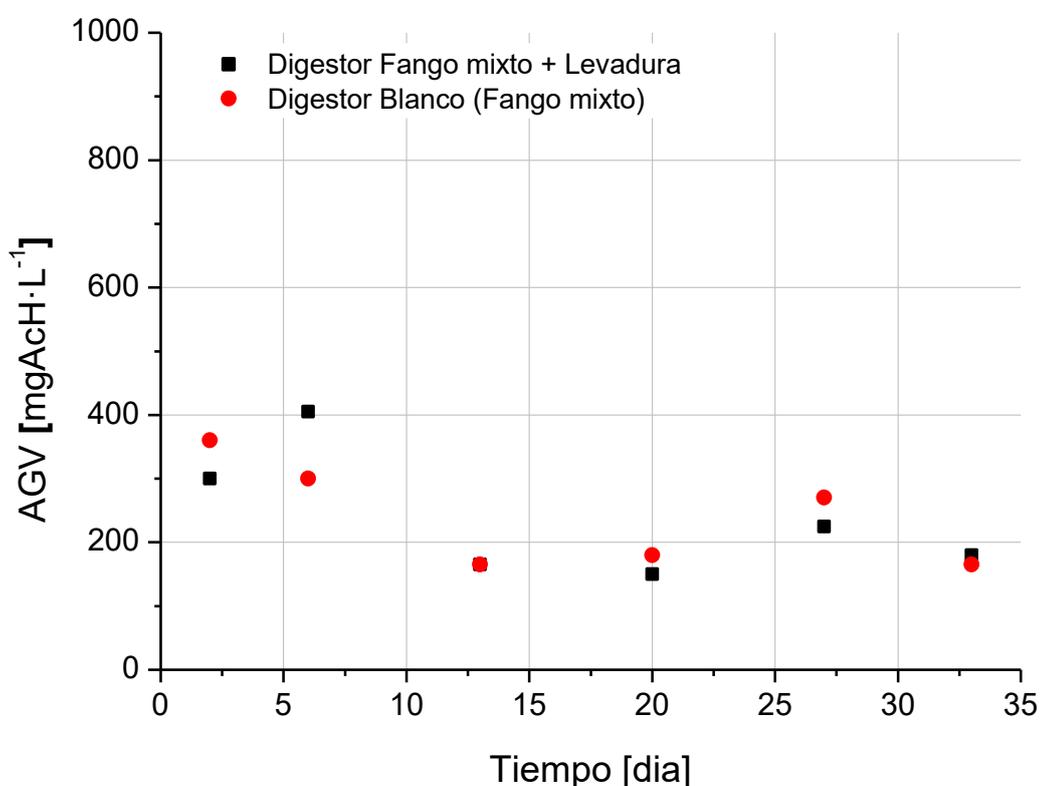


**Figura 5.9.-** Valores de alcalinidad total en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2%, y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.

#### b) Ácidos grasos volátiles.

Los ácidos grasos volátiles son considerados como los productos intermedios más importantes en los procesos de digestión anaerobia a estudio y, por lo tanto, su concentración es un parámetro esencial para el seguimiento del proceso. Para poder determinar si el sistema sufre inhibición, debe controlarse la concentración de AGV tanto en la etapa inicial como durante la etapa de mayor estabilidad del sistema, pues un aumento o disminución brusca de la concentración de AGV podría ser considerado como síntoma de una posible inhibición del proceso. Ésta puede ser causada por la acumulación de AGV que tiene lugar cuando las bacterias acidogénicas los producen a una tasa mayor a la de su consumo por las bacterias metanogénicas. Concentraciones elevadas de AGV generarían un descenso en el pH produciéndose la acidificación del reactor.

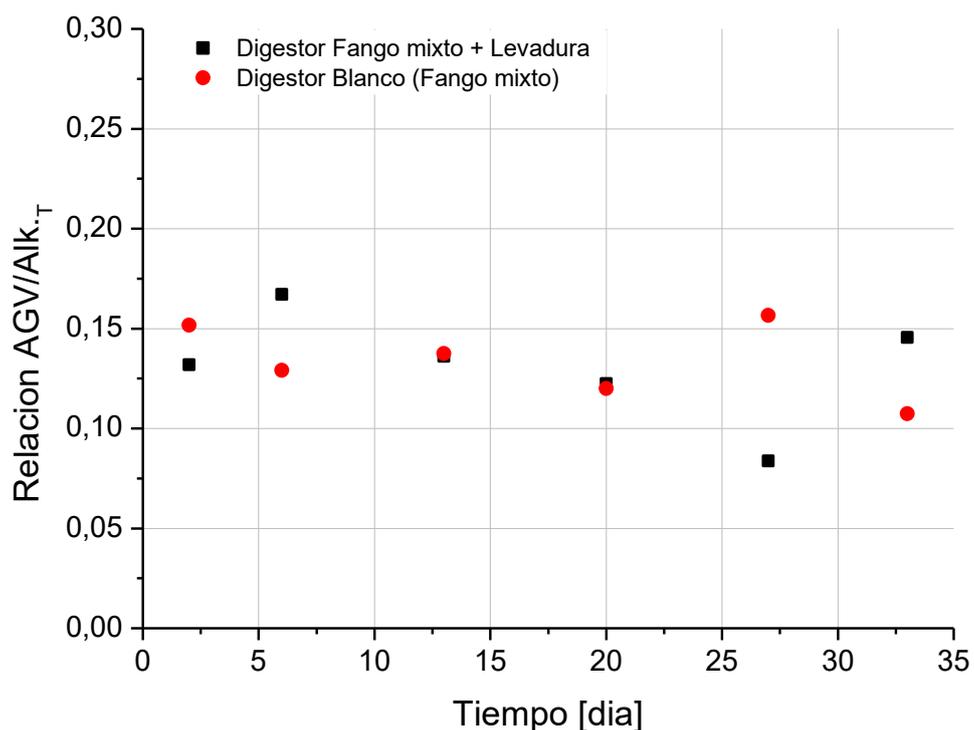
En la Figura 5.10 se muestran las concentraciones de AGV obtenidas a lo largo del ensayo. Al comienzo del mismo, y en ambos digestores, los valores oscilan entre 300-400 mg<sub>AcH</sub>/L y, a partir del decimotercer día, dichos valores descienden ligeramente, estabilizándose en un rango de 100-250 mg<sub>AcH</sub>/L. Durante todo el ensayo no se detectan picos extremos de AGV debido a la acumulación de los mismos. Igualmente, el pH se mantiene estable. Dichos indicadores muestran que el sistema se ha mantenido estable y sin indicios de episodios de inhibición.



**Figura 5.10.-** Concentración de AGV en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2%, y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.

Para verificar el correcto funcionamiento del sistema, otro de los factores básicos es la medida de la relación AGV/ALK<sub>T</sub>. Se considera que cuando la relación se acerca a valores de 0,80, o superiores, el digestor comienza a acidificarse. Los valores obtenidos de relación AGV/ALK<sub>T</sub>, Figura 5.11, varían desde 0,1 hasta 0,2,

aproximadamente. Estos valores son inferiores a los valores de inhibición típicos consultados en la bibliografía, por lo que se puede concluir que el sistema anaerobio muestra una gran estabilidad, especialmente en el caso del reactor ensayo al que se le adicionando levadura como aditivo.



**Figura 5.11.-** Relación AGV/ALK<sub>T</sub> en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2%, y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.

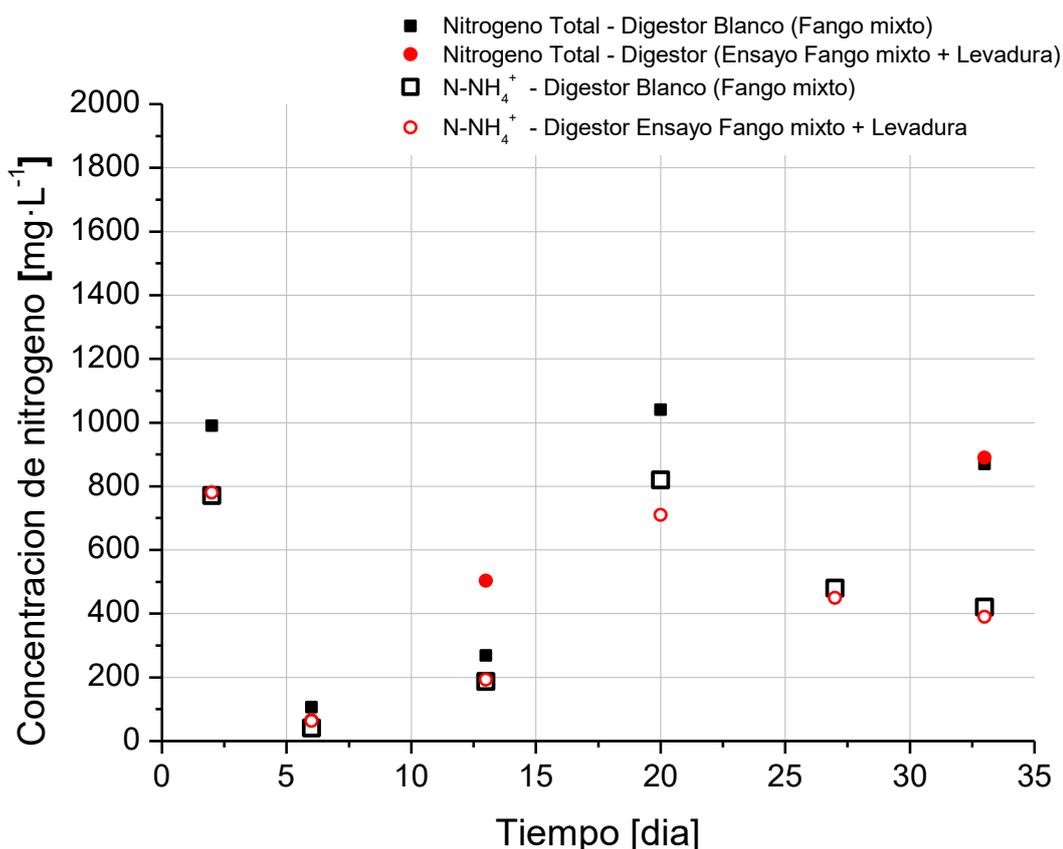
### c) Nitrógeno total y amoniacal.

El contenido total de nitrógeno corresponde al nitrógeno orgánico (proteínas, aminoácidos, etc.), amoníaco, nitrito y nitrato. A su vez, el nitrógeno amoniacal se encuentra en solución acuosa, bien en forma de ion amonio, o como amoníaco, en función del pH de la solución. A pH superiores a 7 predomina el amoníaco, mientras que el ion amonio aparece a valores de pH menores que 7. El nitrógeno amoniacal se considera un compuesto tóxico para las bacterias metanogénicas,

por lo que mantener un nivel óptimo, para garantizar un buen funcionamiento sin efectos inhibitorios, es particularmente importante.

Para prevenir posibles inhibiciones del sistema se ha medido la concentración de  $\text{NH}_4^+$  en ambos digestores. En la Figura 5.12 se observa que las concentraciones de nitrógeno amoniacal no superan en ningún caso  $0,9 \text{ g/L}$ , siendo inferiores al límite de inhibición referenciado para algunos autores, ( $2,5 \text{ g N-NH}_4^+/\text{L}$ ) [1].

Ligada a la concentración de  $\text{N-NH}_4^+$  se encuentra la concentración de nitrógeno total. La Figura 5.12 muestra que en ambos reactores la concentración es estable y no sobrepasa  $1,1 \text{ g/L}$ , estando presente la mayoría del nitrógeno total en forma de nitrógeno amoniacal.



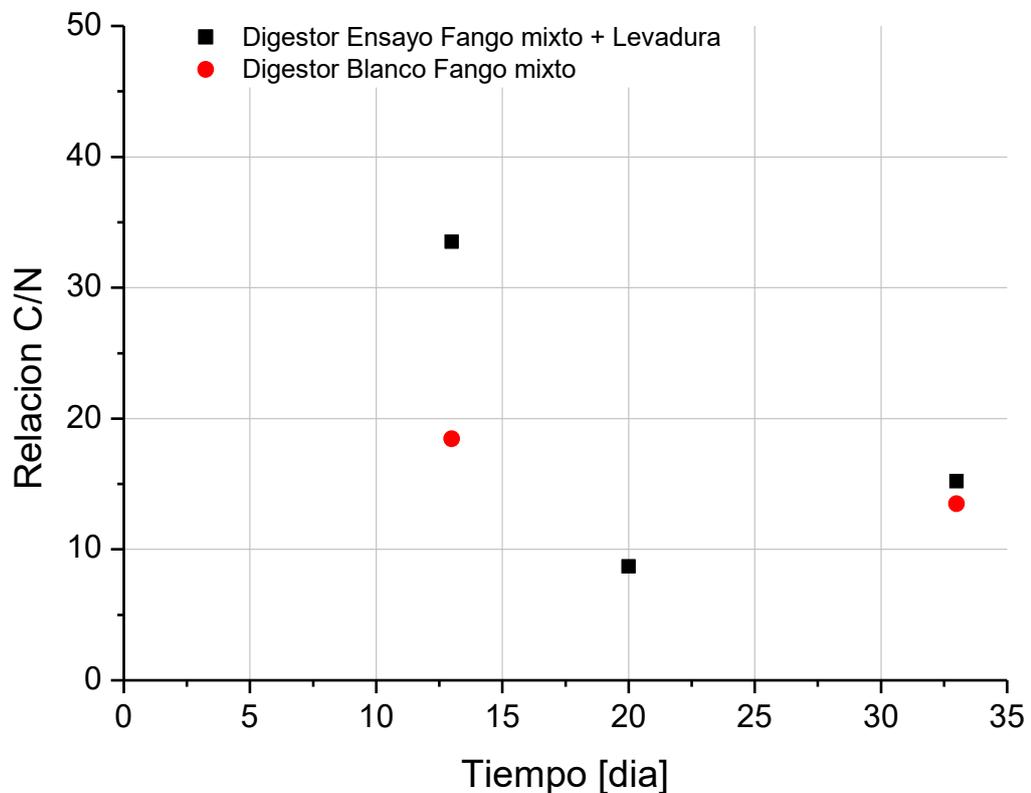
**Figura 5.12.-** Concentración de nitrógeno total y nitrógeno amoniacal en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2%, y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.

#### d) Relación carbono / nitrógeno.

La velocidad de degradación de la materia orgánica está determinada principalmente por las cantidades relativas de carbono y nitrógeno presentes en el lodo. El carbono es fuente de energía para los microorganismos, aunque además de una fuente de carbono orgánico, los microorganismos requieren de nitrógeno, fósforo y otros factores de crecimiento que tienen efectos complejos. Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptima para evitar la inhibición de las bacterias metanogénicas por falta de los mismos.

En cuanto a la relación C/N de los lodos digeridos, se conoce que los lodos estabilizados suelen presentar relaciones C/N alrededor de 10, y los poco estabilizados entre 15-20. Realmente, una relación C/N menor de 8 inhibe la actividad bacteriana debido a un excesivo contenido en amonio.

En la Figura 5.13 se representan los valores de la relación C/N obtenidos durante los ensayos. En ella, se aprecia buena estabilidad en los mismos a partir de la segunda semana de ensayo, con valores comprendidos entre 10-20.



**Figura 5.13.-** Relación C/N en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2%, y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.

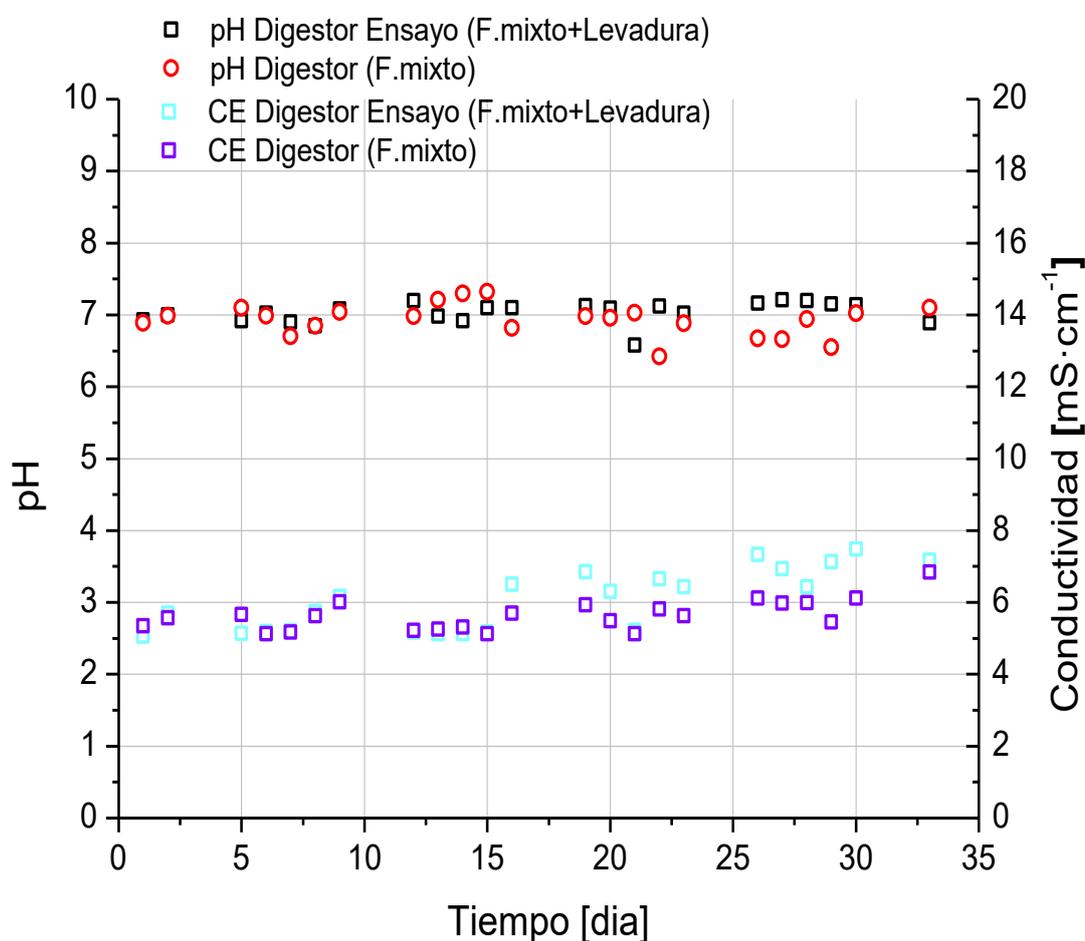
e) pH y Conductividad Eléctrica.

Durante el proceso de digestión ocurren multitud de reacciones ácido-base, siendo el pH en el interior de los digestores dependiente de las mismas.

Las bacterias metanogénicas tienen un pH óptimo de desarrollo comprendido entre 6,8 y 7,4. A valores de pH inferiores a 6,2 estas bacterias pueden inhibirse, mientras que las acidogénicas continuarían su actividad, al tener un mayor intervalo de pH óptimo para su desarrollo, pudiendo producirse entonces una acumulación de AGV en el digestor.

El pH en el interior de ambos digestores se ha mantenido entre 6,5-7,5 a lo largo de todo el ensayo (Figura 5.14) situándose dentro del rango óptimo de crecimiento de las bacterias metanogénicas.

En cuanto a la conductividad eléctrica (CE), se mantiene en el rango 5 - 8 mS/cm en ambos digestores. Dichos valores son considerados dentro de la normalidad, y, por lo tanto, no tienen influencia negativa en el proceso. El pH y la conductividad son un reflejo más del buen funcionamiento de estos sistemas.



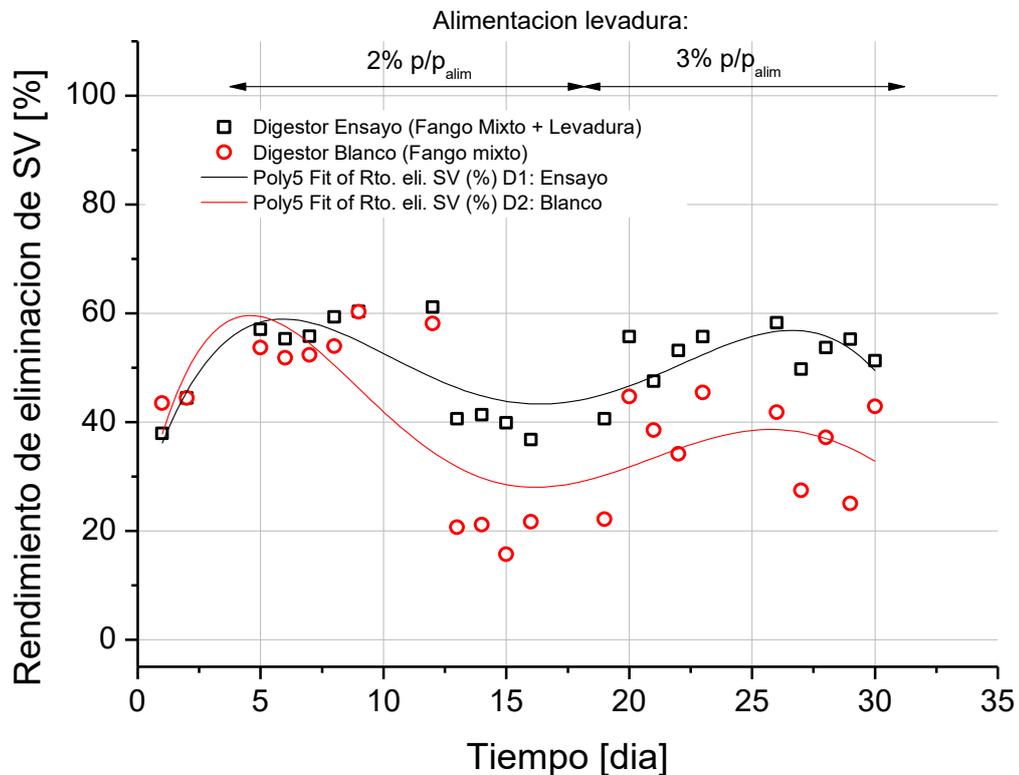
**Figura 5.14.-** pH y conductividad eléctrica en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2%, y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.

#### f) Rendimiento de eliminación de materia orgánica.

En la Figura 5.15 se representa el porcentaje de eliminación de sólidos volátiles en ambos digestores. Con el fin de comparar los resultados obtenidos en ambos se ha realizado un ajuste polinómico (grado 5). La ecuación polinómica para el digestor ensayo es:  $2 \cdot 10^{-5}x^5 - 0,0033x^4 + 0,1734x^3 - 3,4478x^2 + 26,034x - 4,2616$  con  $R^2 = 0,9427$ . La ecuación polinómica para el digestor blanco es:  $9 \cdot 10^{-5}x^5 - 0,0093x^4 + 0,3399x^3 - 5,3413x^2 + 32,15x - 6,9216$  con  $R^2 = 0,9508$  por lo que el grado de ajuste en ambas gráficas se considera que es bueno. En dicho ajuste se aprecia la misma tendencia en cuanto a eliminación de materia orgánica para los dos sistemas, siendo su promedio de eliminación del 50% en el digestor ensayo y del 39% en el digestor blanco.

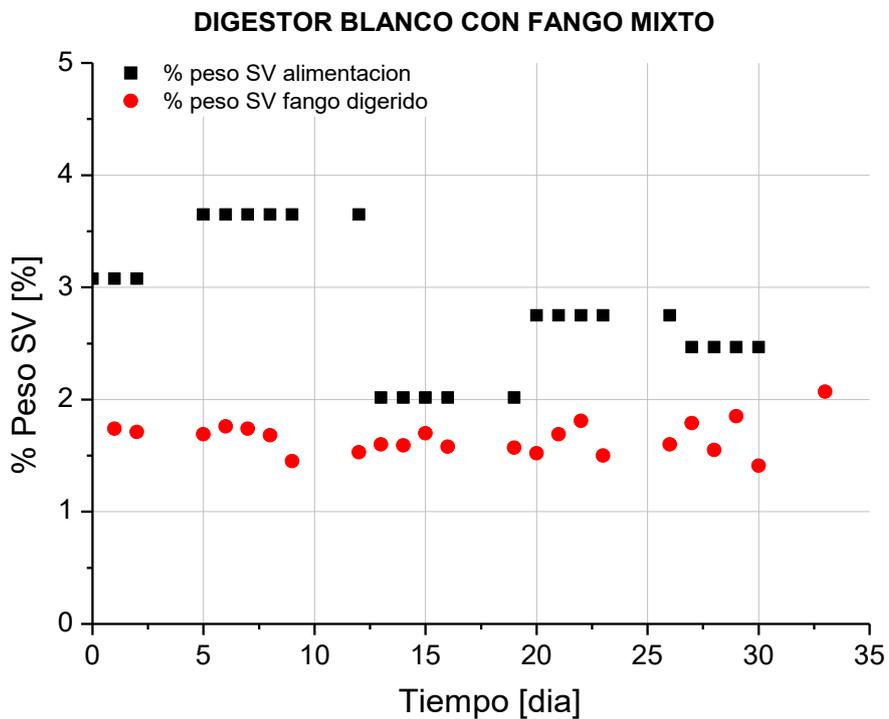
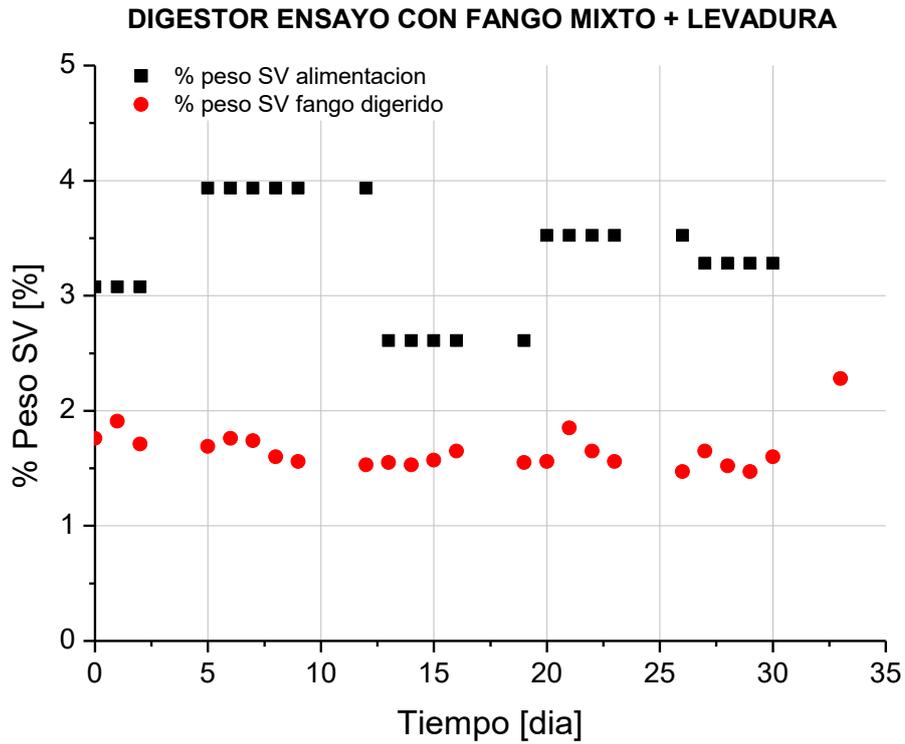
Esta diferencia puede ser debida, tanto al hecho de que los dos sistemas trabajan con distinta carga, como al efecto positivo de la adición de levadura al lodo mixto. Los bajos resultados que se observan en torno al día 15 del ensayo son debidos a la baja concentración de SV en el lodo mixto utilizado esos días.

En cuanto a la comparación de resultados obtenidos entre los dos periodos de alimentación de levadura (2 y 3% p/v<sub>alim.</sub>), no se produce un incremento apreciable en la concentración de SV en el lodo digerido al aumentar la dosis de levadura.



**Figura 5.15.-** Rendimiento de eliminación de sólidos volátiles (SV) en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + levadura. Ajuste polinómico (grado 5) de los datos obtenidos a lo largo del ensayo.

La evolución del porcentaje en peso de SV en los lodos en digestión comparado con la concentración de SV en las corrientes de alimentación se muestra en la Figura 5.16. En ella se observa que la alimentación de SV es superior en el caso del digestor ensayo debido a la incorporación de levadura, y que el porcentaje de SV encontrado en los lodos es similar en ambos digestores. Por tanto, el mayor rendimiento de eliminación de materia orgánica también ocurre en el digestor ensayo (al que se le ha añadido levadura), como se vio anteriormente.

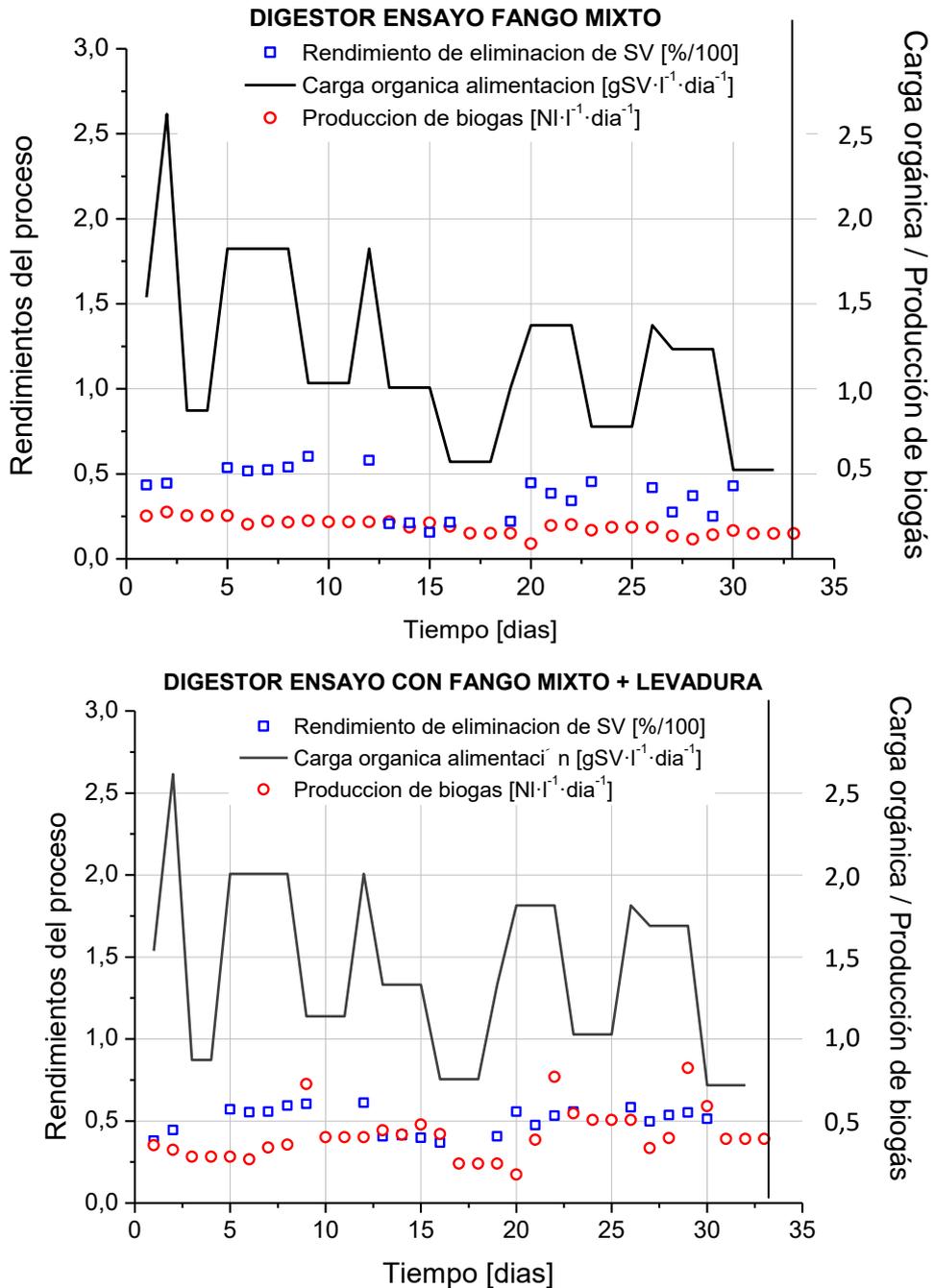


**Figura 5.16.-** Concentración de SV en alimentación y fango digerido para los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2%, y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.

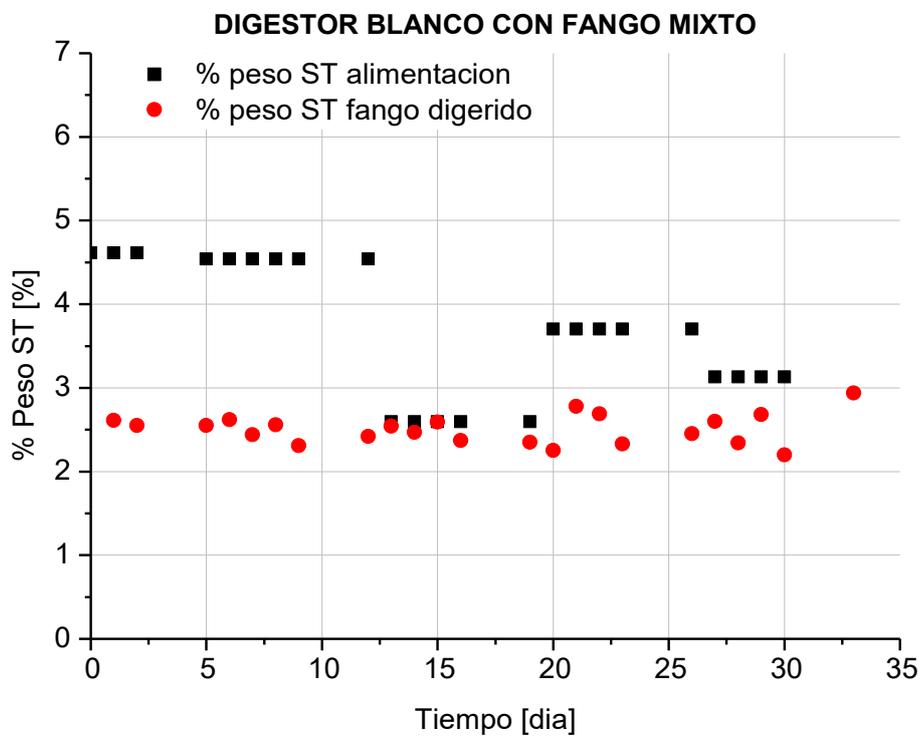
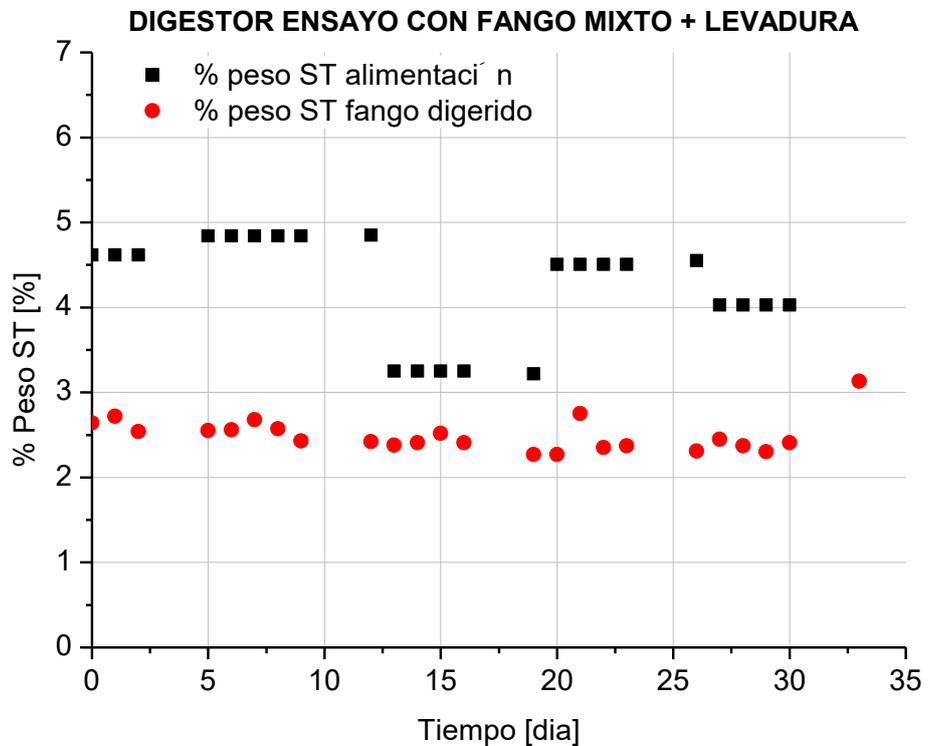
Los rendimientos de eliminación de SV y de producción de biogás en relación con la carga orgánica de alimentación (OLR) para ambos digestores se muestran en la Figura 5.17. En el caso del digestor alimentado sólo con lodo mixto se observan valores con mayor continuidad, tanto en la producción de biogás como en el rendimiento de eliminación de volátiles. La adición de levadura, da lugar, tanto a mayores producciones de biogás, como a un mayor rendimiento de eliminación de materia orgánica.

La concentración de ST en el lodo digerido determina, en buena medida, la producción de lodos a deshidratar y posteriormente a gestionar, siendo el coste de dicha gestión uno de los más significativos de explotación de las EDAR. Es bastante importante mantener homogeneidad en los lodos digeridos, ya que una mayor concentración de sólidos en los lodos implicaría incremento en los costes de gestión y, por tanto, un mayor coste energético en la agitación del sistema.

La Figura 5.18 presenta las concentraciones de ST en la alimentación y en los lodos de ambos digestores. Comparando ambas gráficas se observa que, aunque el porcentaje de ST de alimentación es superior en el digestor ensayo, la concentración en el lodo de fermentación es similar en ambos sistemas. Ello vuelve a indicar que la mayor parte de los sólidos presentes en la levadura son degradados durante la digestión. Por lo tanto, y según esto, es de esperar una escasa o nula generación adicional de lodos a deshidratar. También, en este sentido, es importante señalar que el contenido en sólidos inorgánicos de la levadura es muy reducido.



**Figura 5.17.-** Rendimiento del proceso (% eliminación de SV y producción de biogás en función de la carga orgánica de alimentación) para ambos digestores. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2%, y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.



**Figura 5.18.-** Concentración de ST en la mezcla de alimentación y en lodo digerido en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2%, y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.

### 5.1.2.3.- Viabilidad técnico económica.

Por la vía de una simulación se ha considerado la posible viabilidad técnico-económica del proceso de digestión anaerobia, utilizando los valores obtenidos en el estudio experimental. Los datos operacionales utilizados en esta simulación son:

- Caudal másico de lodo mixto: 150 Tm/día.
- Concentración de ST (3,10%) y SV (2,47%) de entrada de lodo a digestor.
- Consumo eléctrico de la EDAR: 11.400 kwh/día.
- Temperatura de digestión: 35°C.
- Levadura con un contenido en ST y SV de 32% y 30%, respectivamente.
- ST en los lodos deshidratados: 22%.
- Potencial de producción de biogás: 0,19 L<sub>biogás</sub>/g<sub>SValim.</sub> y 0,56 L<sub>biogás</sub>/g<sub>SValim.</sub>, para lodo mixto y mezcla levadura, respectivamente.
- Costes de transporte y equipos para un posible pretratamiento considerados nulos.
- 50% de rendimiento de eliminación de materia orgánica para el ensayo con levadura y 39% para el ensayo en blanco. El rendimiento de eliminación de SV se ha fijado como el valor medio obtenido en los ensayos.

En la Figura 5.15, se mostraron las gráficas de ajuste polinómico referentes al rendimiento de eliminación de SV, materia orgánica, en ambos sistemas. En dichas gráficas se apreciaba que, en el caso del digestor alimentado con lodos y levadura, el rendimiento es ligeramente más alto que el blanco, ya que la mayor concentración de puntos está por encima de los puntos del digestor alimentado sólo con lodo mixto.

Con los datos operacionales anteriores y los resultados de las fermentaciones se han realizado las simulaciones del proceso, y se ha determinado el coste asociado a cada sistema, así como el ahorro con respecto al proceso de digestión real en las EDAR.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.7. Es importante resaltar que la levadura utilizada en los ensayos contiene un 30% de materia seca aproximadamente, mientras que su presentación comercial como subproducto es normalmente del 15% de materia seca. Para la realización de las simulaciones se han considerado ambos factores.

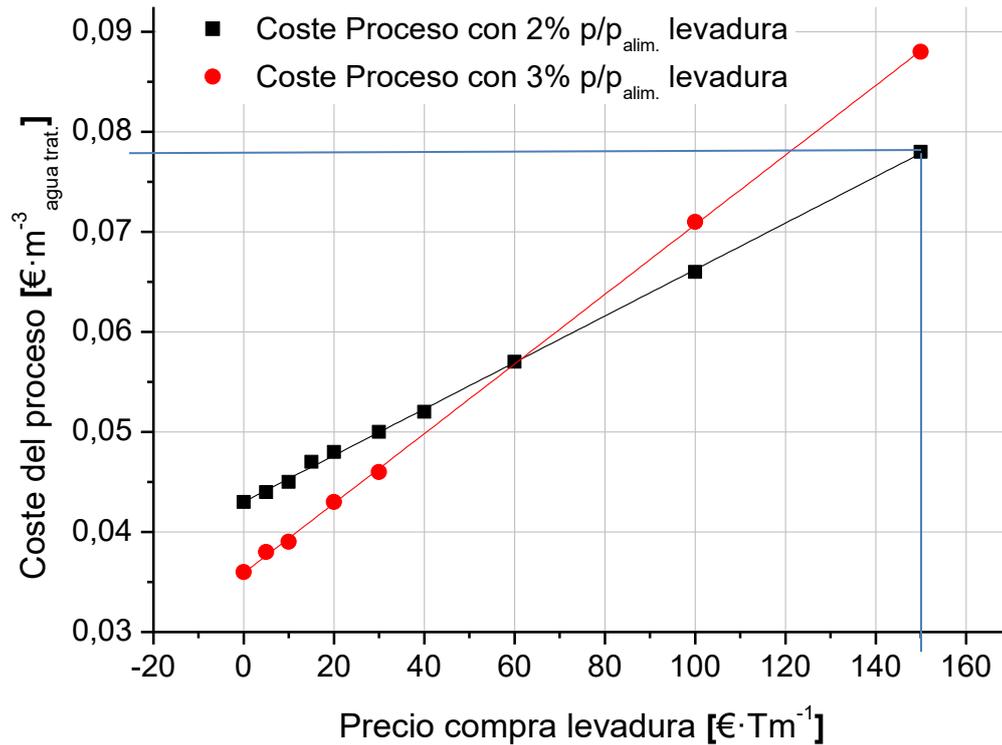
Las simulaciones muestran que la adición de levadura reduce los costes asociados al proceso de digestión, ya que disminuye significativamente el gasto por consumo de electricidad y aumenta el calor residual de cogeneración aprovechable para el calentamiento del digestor.

Para el caso de la levadura concentrada, el precio de adquisición de la misma determinará qué dosis resulta óptima de cara a minimizar los costes del proceso. La Figura 5.19 presenta los costes del proceso para los dos casos estudiados (2 y 3%  $p/v_{alim.}$ ) en función del coste de la levadura. Puede observarse de acuerdo con el punto donde se cortan las dos líneas, cómo la adición de levadura en un 2%  $p/v_{alim.}$  resulta ventajosa si el precio de adquisición de la misma está por encima de los 60 €/Tm aproximadamente. Si el precio es menor, es la adición en un 3%  $p/v_{alim.}$  la que resulta ventajosa.

Como también puede verse en la Figura 5.19 en el caso de adicionar un 2%  $p/v_{alim.}$  de levadura, con un 30% de materia seca, para que el proceso reportase beneficios con respecto a la situación actual, en que sólo se tratan lodos mixtos, cuyo coste es de 0,078€/m<sup>3</sup> de agua tratada, el precio de la levadura podría admitirse hasta 150 €/Tm. En el caso en que la adición fuera de un 3%  $p/v_{alim.}$  de levadura, con un 30% de materia seca, el precio tendría que ser más bajo, de 122 €/Tm.

Añadiremos, finalmente, que, aunque técnica y económicamente saldría rentable el uso de levadura como aditivo al proceso de digestión anaerobia, podría tener inconvenientes de logística, ya que, en la actualidad, en España sólo opera una multinacional, fabricante de levadura prensada, que sólo se suministra en paquetes de máximo 5 kg. y la cantidad diaria necesaria de levadura a concentración del 2% es de 3000Kg/día (Tabla A.1.3 del Anexo 1). Otro

inconveniente añadido sería que la levadura deberá ser almacenada con temperatura máxima 5°C, y las plantas deberían contar con espacio suficiente para poder instalar sistemas de refrigeración para el correcto almacenamiento de la misma.



**Figura 5.19.-** Costes del proceso de digestión anaerobia según la concentración de levadura alimentada (2 y 3 % p/v<sub>alim.</sub>), en función de su precio de adquisición.

**Tabla 5.7.-** Simulaciones del proceso de digestión anaerobia cuando se añaden distintas concentraciones de levadura como aditivo.

Definición variable	Símb.	Uds.	Blanco (Ver Tabla A.3.1)	Levadura (2%) (Ver Tabla A.3.2)	Levadura (3%) (Ver Tabla A.3.3)
Caudal de agua residual tratado EDAR	$Q_A$ <sup>1</sup>	m <sup>3</sup> /día	25.852	25.852	25.852
Caudal másico de lodo mixto	$M_1$ <sup>2</sup>	kg/día	150.000	150.000	150.000
Caudal másico de levadura	$M_2$ <sup>3</sup>	kg/día	-	3.000	4.500
% Reducción SV en digestión	%R <sub>SV</sub> <sup>4</sup>	%	39	50	50
Producción diaria de biogás	$V_{gas}$ <sup>5</sup>	Nm <sup>3</sup> /día	679	1.519	1.939
Energía eléctrica generada en cogeneración	$E_{elec,cog}$ <sup>6</sup>	kWh/día	2.760	6.174	7.881
Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$ <sup>7</sup>	€/día	532	549	590
Coste consumo eléctrico (con autoconsumo)	$C_{cons,elec}$ <sup>8</sup>	€/día	821	496	334
Coste consumo gasoil calefacción	$C_{gasoil}$ <sup>9</sup>	€/día	705	75	0
Coste compra máximo de levadura	$C_{lev}$ <sup>10</sup>	€/Tm	-	150	122
Coste total con precio de levadura = 65€/Tm	$C_{TOTAL}$ <sup>11</sup>	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,078	0,050	0,058

<sup>1</sup>  $Q_A$ : Caudal de agua residual que entra a la EDAR.

<sup>2</sup>  $M_1$ : Caudal de lodos que entra al digester.

<sup>3</sup>  $M_2$ : Caudal de aditivo.

<sup>4</sup> %R<sub>SV</sub>: En los digestores, el %SV que se reduce por la digestión anaerobia.

<sup>5</sup>  $V_{gas}$ : El biogás que se genera al día.

<sup>6</sup>  $E_{elec,cog}$  = (Potencia Instalada planta \* Horas funcionamiento x 2)/365.

<sup>7</sup>  $C_{gest,lodo}$  = Cantidad lodos x Precio Gestión de lodos a deshidratar.

<sup>8</sup>  $C_{cons,elec}$  = Consumo eléctrico neto en la EDAR x Precio energía eléctrica medio. (Considerando que por lo menos, la mitad de la demanda de energía eléctrica es cubierta con la cogeneración, se puede ajustar el consumo para usar la electricidad de la red en las horas más baratas)

<sup>9</sup>  $C_{gasoil}$  = Gasto de gasoil para calentar los digestores.

<sup>10</sup>  $C_{lev}$ : Coste máximo que debería valer el aditivo para que el proceso fuera más barato que sin él.

<sup>11</sup>  $C_{TOTAL}$  = ( $C_{gest,lodo}$  +  $C_{cons,elec}$  +  $C_{trans}$  +  $C_{amort.}$ )

## 5.2.- Ensayos con residuos.

### 5.2.1.- Estudio del potencial de biometanización en discontinuo.

Los resultados aquí expuestos se corresponden con los Experimentos Programados en el apartado 4.2.2.1.b) de esta memoria.

#### 5.2.1.1.- Bloque de Ensayos 4.

Estos ensayos, con lodos de la EDAR A, duraron 27 días en los que se fue recogiendo y registrando la producción diaria acumulada de metano. En las gráficas de la Figura 5.20 está representada la producción acumulada de metano correspondiente a cada una de las mezclas ensayadas en cada reactor.

En dicha Figura 5.20 se aprecian tres niveles de producción de metano, dependiendo del tipo de residuo utilizado en cada combinación. La mayor generación de metano se corresponde con la adición de residuos de matadero y la menor a las muestras en las que se añadió lixiviado como aditivo a los reactores. La mezcla de lixiviado y lodo muestra producciones de metano inferiores a las producidas por el blanco, indicando claramente inhibición por el lixiviado de este proceso de digestión anaerobia.

También puede observarse una producción intermedia de metano generado por la mezcla de los tres residuos (matadero, lixiviado y deyecciones ganaderas) y también por las deyecciones ganaderas. Entre ambas, la producción de la mezcla de residuos es superior a la de los reactores en los que solo se utilizaron deyecciones ganaderas como aditivo.

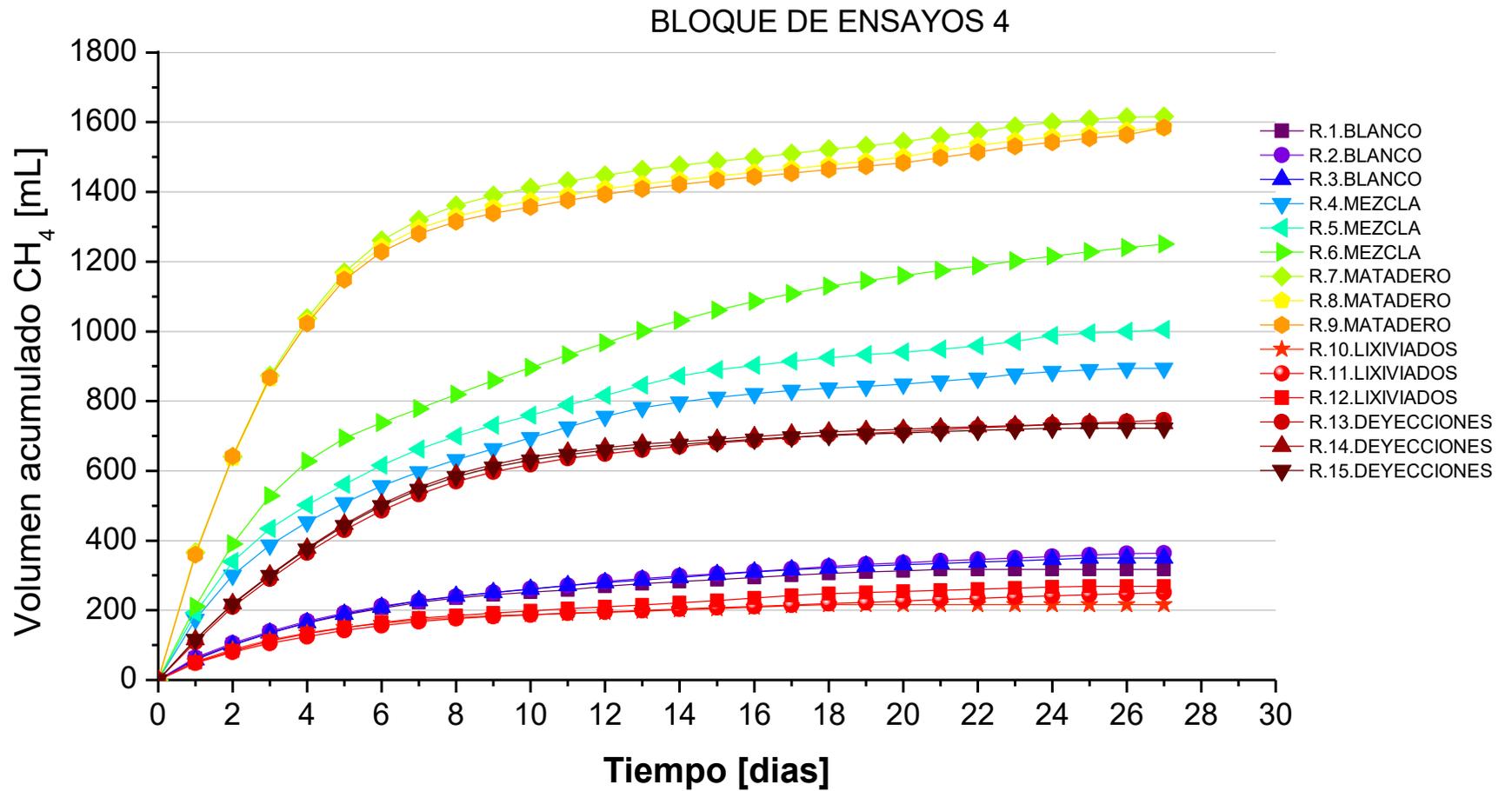


Figura 5.20.- Bloque de Ensayos 4. Volumen de CH<sub>4</sub> acumulado en función del tiempo.

La Tabla 5.8 muestra los resultados obtenidos de volumen acumulado de metano en cada una de las mezclas, así como los valores calculados del potencial de biometanización ( $N_{LCH_4}/g_{SV}$ ). Los residuos de matadero presentan una generación de metano significativa, siendo ésta el doble de la producción obtenida con las deyecciones ganaderas. La muestra con mezcla de los tres residuos genera un volumen de metano superior al generado por las deyecciones ganaderas. Finalmente, la baja producción de metano de los lixiviados no sólo se debe a la baja relación de carga / aditivo ensayada, sino también a que se produce inhibición de la actividad microbiana, lo cual se comprueba al observar que su producción de metano es inferior a la de los ensayos del control Blanco. Es probable que el efecto causado por el lixiviado sea consecuencia de su elevado nivel de salinidad ya que su conductividad es de 35.000  $\mu S/cm$ .

**Tabla 5.8.-** Resultados obtenidos: Volumen de metano acumulado y potencial de biometanización en discontinuo (BMP) en cada una de las mezclas del bloque 4 de ensayos en la EDAR A.

<b>Mezclas EDAR A<sup>1</sup> (Relación <math>L_{dig A}</math>/aditivo)</b>	<b><math>V_{CH_4}</math><sup>2</sup> [Nm<sup>3</sup>]</b>	<b>BMP<sup>3</sup> [NL/g<sub>SV</sub> aditivos] <math>\pm</math> SD<sup>4</sup></b>
$L_{dig A}$	343,70	0,035 $\pm$ 0,002
M1 ( $L_{dig A}$ + MAT, LIX y DEY) (2:0,5; 0,075; 0,425)	1049,97	0,268 $\pm$ 0,069
M2 ( $L_{dig A}$ + MAT) (2:0,5)	1595,31	0,529 $\pm$ 0,008
M3 ( $L_{dig A}$ + LIX) (2:0,1)	245,42	0,000 $\pm$ 0,000
M4 ( $L_{dig A}$ + DEY) (2:0,5)	734,55	0,294 $\pm$ 0,009

MAT: Residuos de matadero; LIX: Lixiviado; DEY: Deyecciones ganaderas

<sup>1</sup>Cuando se habla de mezcla, se refiere a las de aditivos y lodos (mixto y digerido) y cuando se menciona aditivos, hace referencia sólo a: levadura, metanol, residuos.

<sup>2</sup> $V_{CH_4}$  es el volumen acumulado de metano en cada reactor a lo largo del ensayo.

<sup>3</sup>Fórmula de BMP de aditivos= ( $V_{CH_4}$  total producido –  $V_{CH_4}$  originado por el lodo mixto –  $V_{CH_4}$  originado por el lodo digerido) / g SV de los aditivos.

<sup>4</sup>Resultados medios  $\pm$  desviación estándar.

Atendiendo a los valores del potencial de biometanización en discontinuo, los residuos de matadero presentan la mayor producción de metano en relación al peso de SV introducido; concretamente unos 0,53  $N_{LCH_4}/g_{SV}$ . Para las deyecciones, o residuos ganaderos y mezcla de lixiviado, deyecciones y residuos de matadero, los potenciales obtenidos son 0,29 y 0,27  $N_{LCH_4}/g_{SV}$ , respectivamente.

Atendiendo a la producción específica de metano de los aditivos estudiados, los residuos de mataderos son claramente la mejor opción, seguido de las deyecciones ganaderas y la mezcla de los tres aditivos, presentando estos dos últimos valores similares de potencial de biometanización.

#### 5.2.1.2.- Bloque de Ensayos 5.

Estos resultados se corresponden con los experimentos programados en el apartado 4.2.2.2.b) de esta memoria.

En este bloque los ensayos duraron 33 días, a lo largo de los cuales se recogió la producción diaria acumulada de metano. En la Figura 5.21 se ha representado la producción acumulada de metano correspondiente a cada una de las mezclas ensayadas.

La gráfica muestra, a diferencia de la del bloque de ensayos anterior, una mayor variabilidad de producción de metano según el tipo de aditivo/os ensayados. La mayor generación de metano se corresponde nuevamente con la de los residuos de matadero, y la menor a las muestras en las que se añadieron deyecciones ganaderas como aditivo a los reactores, Tabla 5.9.

Se debe destacar la producción intermedia generada, por un lado, por la mezcla de los tres residuos (matadero, deyecciones ganaderas y vegetales) y, por otro, la producida por los vegetales. Es más, se puede observar cómo la producción de la mezcla de residuos es superior a la de los reactores en los que sólo se utilizaron vegetales como aditivo, llegando incluso a ser muy próxima a la generada por los residuos de matadero.

Comparando la producción total de biogás de los residuos de matadero y de la mezcla de residuos se aprecia cómo ambas son muy parecidas (algo mayor en el caso de los residuos de matadero), Tabla 5.9. También se observa en la Figura 5.21 una velocidad de producción de metano menor en el caso de la mezcla de residuos, ya que, en el caso de los residuos de matadero, prácticamente todo el biogás se genera en los primeros 12 días, mientras que en el caso de la mezcla de

residuos se aprecia una velocidad de producción prácticamente lineal durante los primeros 18 días, y algo inferior, pero todavía casi lineal y significativa, durante el resto del experimento. Esto es debido a que la mezcla de residuos tiene una biodegradabilidad más lenta, lo cual con casi toda seguridad es debido a los vegetales. Esto se comprueba observando en la Figura 5.21 los resultados del ensayo realizado únicamente con vegetales, y comparándolos con los de los ensayos realizados con residuos de matadero y deyecciones ganaderas. Tanto en el caso de los residuos de matadero como en el de los residuos ganaderos, prácticamente todo el biogás se produce en los primeros 12 días de ensayo. En el caso de los vegetales se aprecia una velocidad de producción significativamente menor a lo largo de todo el ensayo.

### BLOQUE DE ENSAYOS 5

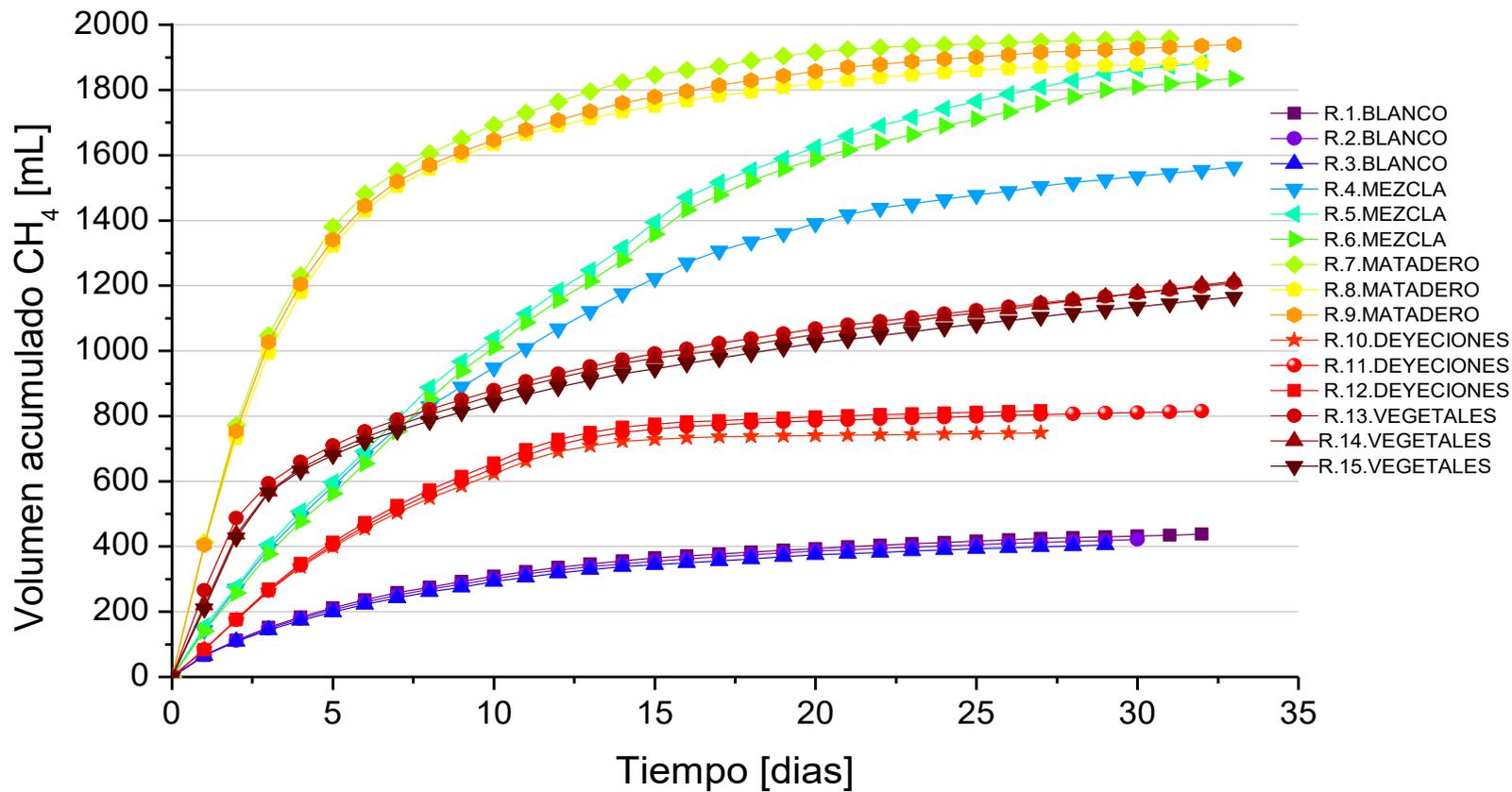


Figura 5.21.- Bloque de Ensayos 5. Volumen de CH<sub>4</sub> acumulado en función del tiempo.

La Tabla 5.9 muestra los datos obtenidos de volumen acumulado de metano en cada una de las mezclas, así como el potencial de biometanización en discontinuo ( $NL_{CH_4}/g_{SV}$ ). Para igual relación lodo/aditivo, los residuos de matadero tienen una generación de metano significativa, siendo muy superior a la producción obtenida, a igual relación, por las deyecciones ganaderas y los vegetales.

Atendiendo a los valores del potencial de biometanización en discontinuo, los mejores resultados se han obtenido tanto con la mezcla de residuos como con residuos de matadero ( $0,46 NL_{CH_4}/g_{SV}$  en ambos casos). También se debe destacar la mayor variabilidad observada en el caso de la mezcla de residuos, lo cual se comprueba con el valor de la desviación estándar. Para las deyecciones se obtiene un valor de potencial de biometanización en discontinuo de  $0,38 NL_{CH_4}/g_{SV}$  aproximadamente, y para los vegetales, de  $0,24 NL_{CH_4}/g_{SV}$ .

**Tabla 5.9.-** Resultados obtenidos: Volumen de metano acumulado y potencial de biometanización en discontinuo (BMP) en cada una de las mezclas del bloque 5 de ensayos en la EDAR C.

Mezclas (Relación $L_{dig} C$ /Aditivo)	$V^1 CH_4$ [Nml]	BMP <sup>2</sup> [NL/g <sub>SV</sub> aditivos] ± SD <sup>3</sup>
$L_{dig} C$	421,04	0,031 ± 0,001
M1 ( $L_{dig} C$ + MAT, DEY y V) (2:0,5; 0,5; 0,5)	1760,81	0,462 ± 0,059
M2 ( $L_{dig} C$ + MAT) (2:0,5)	1926,63	0,463 ± 0,012
M3 ( $L_{dig} C$ + DEY) (2:0,5)	793,57	0,378 ± 0,039
M4 ( $L_{dig} C$ + V) (2:0,5)	1194,51	0,238 ± 0,008

MAT: Residuos de matadero; DEY: Deyecciones ganaderas; V: Residuos vegetales.

<sup>1</sup> $V_{CH_4}$  es el volumen acumulado de metano en cada reactor a lo largo del ensayo.

<sup>2</sup>Fórmula de BMP= ( $V_{CH_4}$  total producido –  $V_{CH_4}$  originado por el lodo mixto –  $V_{CH_4}$  originado por el lodo digerido) / g SV de los aditivos.

<sup>3</sup>Resultados medios ± desviación estándar.

### 5.2.1.3.- Bloque de Ensayos 6.

Los ensayos de este bloque duraron 28 días, a lo largo de los cuales se recogió la producción diaria acumulada de metano. En las gráficas de la Figura 5.22 están representadas las producciones acumuladas de metano correspondientes a cada una de las mezclas ensayadas.

En esta representación de la producción acumulada de metano se pueden apreciar varios aspectos. Por una parte, la existencia de tres niveles de generación claramente diferenciados, correspondientes a los ensayos realizados con lixiviado, vegetales y mezcla de residuos. Por otra, que los tres reactores cargados con el residuo industrial presentan curvas de producción acumulada de metano dispares.

Cabe destacar la variabilidad de resultados obtenida con el residuo industrial, donde se obtiene una curva de producción similar a las de mezcla de residuos, (de hecho, la producción más alta de los 12 ensayos). Otra curva proporciona un valor algo inferior al de dicha mezcla, (pero superior a la de los vegetales), y finalmente, unos valores inferiores a las de vegetales. Este hecho que no se ha dado en el resto de ensayos, se ha tenido en cuenta a la hora de analizar los resultados y calcular el potencial de biometanización del residuo industrial. Como ya se expuso, la realización de cada combinación por triplicado se lleva a cabo por seguridad, y para eliminar posibles fallos durante el transcurso del ensayo. En este caso, y considerando que el reactor 7 pudo sufrir algún tipo de fallo, bien por obstrucción de las celdas de medida o por pérdida de las condiciones anaerobias, se desestima dicho resultado y se utilizan los datos obtenidos en los reactores 8 y 9 para realizar la determinación del potencial de biometanización de este residuo.

Como puede verse, la mayor generación neta de metano corresponde a la mezcla de residuos (residuo industrial, vegetal y lixiviado), seguida muy de cerca del residuo industrial. Con una producción significativamente menor se encuentran los residuos vegetales, y por último el lixiviado.

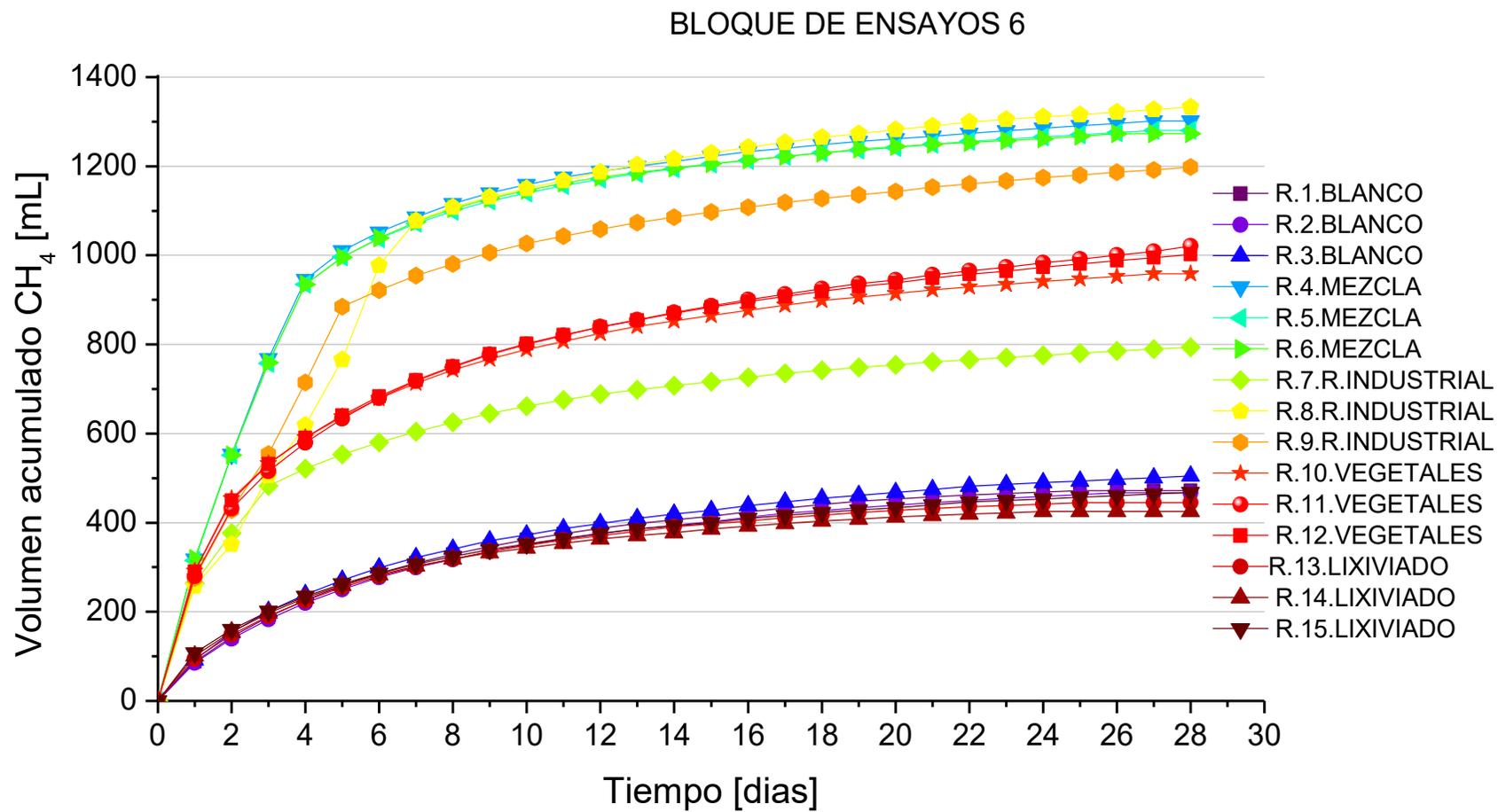


Figura 5.22.- Bloque de Ensayos 6. Volumen de CH<sub>4</sub> acumulado en función del tiempo.

La Tabla 5.10 muestra los datos de volumen acumulado de metano obtenidos en cada una de las mezclas, así como el potencial de biometanización (NL/g<sub>SVaditivos</sub>). Para la relación Lodos/Aditivos (2:0,5), el residuo industrial presenta el mayor potencial de producción de metano (0,368 NL<sub>CH4</sub>/g<sub>SVaditivos</sub>). El segundo mayor potencial de biometanización corresponde a la mezcla de residuos, con un valor de 0,235 NL/g<sub>SVaditivos</sub>. Finalmente, y al igual que ocurría en la EDAR C, los residuos vegetales muestran un valor bajo de potencial de biometanización en discontinuo, con 0,215 NL<sub>CH4</sub>/g<sub>SVaditivos</sub>. En este último bloque de ensayos, igual que ocurría en el bloque de ensayos de la EDAR A, existe una baja producción de metano en aquellos reactores en los que se utiliza como aditivo lixiviado, siendo también dicha producción inferior a la obtenida en los ensayos de control (Blancos).

**Tabla 5.10.-** Resultados obtenidos: Volumen de metano acumulado y potencial de biometanización en discontinuo (BMP) en cada una de las mezclas del bloque 6 de ensayos en la EDAR B.

<b>Mezclas (Relación L<sub>dig B</sub>/Aditivo)</b>	<b>V<sup>1</sup> CH<sub>4</sub> [Nm<sup>3</sup>]</b>	<b>BMP<sup>2</sup> NL/g<sub>sv aditivos</sub> ± SD<sup>3</sup></b>
L <sub>dig B</sub>	481,78	0,049 ± 0,002
M1 (L <sub>dig B</sub> + RI, TV y LIX) (2:0,5; 0,425; 0,075)	1284,75	0,235 ± 0,004
M2 (L <sub>dig B</sub> + RI) (2:0,5)	1265,26	0,368 ± 0,045
M3 (L <sub>dig B</sub> + V) (2:0,5)	993,51	0,215 ± 0,013
M4 (L <sub>dig B</sub> + LIX) (0,05)	446,03	0,000 ± 0,000

RI: Residuo industrial; V: Residuos Vegetales; LIX: Lixiviado.

<sup>1</sup>V<sub>CH4</sub> es el volumen acumulado de metano en cada reactor a lo largo del ensayo.

<sup>2</sup>Fórmula de BMP de aditivos = (V<sub>CH4</sub> total producido – V<sub>CH4</sub> originado por el lodo mixto – V<sub>CH4</sub> originado por el lodo digerido) / g SV aditivos.

<sup>3</sup>Resultados medios ± desviación estándar.

Los resultados de este bloque indican que, si se utiliza como factor de decisión la producción de metano, el residuo industrial, y en menor medida, la mezcla de residuos, son las mejores opciones.

#### 5.2.1.4.- Balance y simulación de costes.

En las Tablas 5.11 a 5.13 se ha estructurado el estudio de costes/beneficios de las operaciones en las distintas EDAR de las que se han utilizado lodos para esta

investigación (cabe destacar que los residuos seleccionados para hacer las simulaciones son seleccionadas por las empresas explotadoras de las EDAR con las que se ha trabajado, según criterios técnicos y económicos), y estudio de la adición de distintos residuos, los cuales pudieran favorecer la producción de metano en el proceso de digestión anaeróbica utilizado, así como explorar la gestión de dichos residuos por esta vía.

Como puede verse en dichas tablas, en ellas figuran los flujos de los materiales utilizados en dichos procesos, lodos y aditivos, la energía producida en la cogeneración y los costes de los distintos epígrafes que componen la simulación y el balance de costes. Al final de los mismos se expresan los costes de compra/venta máximos a que podrían pagarse los distintos residuos para que la operación de tratamiento no fuera onerosa.

El análisis de los resultados nos lleva a las siguientes consideraciones:

Entre los aditivos estudiados en los distintos bloques de ensayos de las EDAR A, B o C, se observa que el residuo con mayor potencial para producir biogás en co-digestión anaerobia con lodos, es el residuo de matadero, ya que ha mostrado un alto potencial de biometanización en las EDAR estudiadas y una velocidad de degradación adecuada para los tiempos de residencia aplicados en dichas EDAR. Sin embargo, su preparación resulta un hándicap importante a tener en cuenta, ya que la recopilación de materiales, y su molienda y acondicionamiento, resultan operaciones laboriosas.

El material lixiviado es el que ha ofrecido el menor potencial de biometanización. Su experimentación con lodo de A, ha dado como resultado un efecto inhibitorio del proceso, así como también sobre el lodo de B; una posible razón podría ser que estas mezclas de lodo y lixiviado superaran en sus características el umbral de inhibición.

En el análisis detallado de costes/beneficios cabe destacar que, aunque no se produzca incremento en la producción de biogás añadiendo como aditivo

lixiviado, su utilización consigue disminuir el coste total de operación de la EDAR, si se valora la retirada del lixiviado como mínimo a 1,29 €/Tm.

Como residuos alternativos a los ensayados de matadero, se podrían considerar, tanto el residuo industrial, como las deyecciones ganaderas.

El residuo industrial tiene como ventaja su elevado potencial de biometanización cuyo valor individual es el siguiente al obtenido con los residuos de matadero. Además, este residuo industrial presenta homogeneidad y nula necesidad de pretratamiento. Las deyecciones, o residuos ganaderos, son un residuo fácil de conseguir y transportar, y con un potencial de biometanización en discontinuo similar al del residuo industrial. Estos residuos tampoco necesitan pretratamiento, aunque su caudal de alimentación resulta más del doble del que es necesario con el residuo industrial, para operar a iguales cargas de alimentación. Por tanto, se ha seleccionado el residuo industrial para el estudio del proceso de digestión anaerobia en semicontinuo.

**Tabla 5.11.-** Tabla de costes/beneficios de la operación en la EDAR A, utilizando los residuos y concentraciones antes seleccionados.

Definición variable	Símbolo	Unidades	Blanco (con Lodo mixto) (Ver Tabla A.2.1)	Lodo+Deyecciones (Ver Tabla A.2.4)	Lodo+Matadero (Ver Tabla A.2.2)	Lodo+Lixiviado (Ver Tabla A.2.3)
Caudal de agua residual tratado EDAR	$Q_A^1$	$m^3 \cdot día^{-1}$	8.000	8.000	8.000	8.000
Caudal másico de lodo a digestión	$M_1^2$	$kg \cdot día^{-1}$	150.000	150.000	150.000	150.000
Caudal másico del aditivo a digestión	$M_2^3$	$kg \cdot día^{-1}$	-	154.000	7.900	6.625
Tiempo de retención hidráulico en digestión	TRH <sup>4</sup>	Días	40,5	20	39	38,8
Producción diaria de biogás	$V_{gas}^5$	$Nm^3 \cdot día^{-1}$	1.648	2.156	3.149	1.648
Energía eléctrica generada en cogeneración	$E_{elec,cog}^6$	$kWh \cdot día^{-1}$	3.348	4.381	6.398	3.348
Coste gestión lodo	$C_{gest,lodo}^7$	$€ \cdot día^{-1}$	419	572	527	435
Coste consumo eléctrico (con autoconsumo)	$C_{cons,elec}^8$	$€ \cdot día^{-1}$	290	192	0,22	290
Coste transporte residuos	$C_{trans}^9$	$€ \cdot día^{-1}$	-	1.170	89	0
Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{amort}^{10}$	$€ \cdot día^{-1}$	-	0	45	0
<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}^{11}$	$€ \cdot día^{-1}$	708,44	1.936,00	710,83	728,00
Coste por unidad de tratamiento	$C_{Unidad}^{12}$	$€ \cdot m^{-3} \text{ agua trat.}$	0,089	0,242	0,083	0,091
Coste máximo compra/venta residuo	$C_{máx \text{ residuo}}^{13}$	$€ \cdot Tm^{-1}$	-	-7,94	6,31	-1,29

<sup>1</sup> $Q_A$ : Caudal de agua residual que entra a la EDAR. <sup>2</sup> $M_1$ : Caudal de lodos que entra al digestor. <sup>3</sup> $M_2$ : Caudal de aditivo.

<sup>4</sup>TRH: Tiempo de retención hidráulico.

<sup>5</sup> $V_{gas}$ : El biogás que se genera al día

<sup>6</sup> $E_{elec,cog}$  = (Potencia Instalada en la planta \* Horas funcionamiento)/365.

<sup>7</sup> $C_{gest,lodo}$  = Cantidad lodos (kg) x Precio de gestión/Kg.

<sup>8</sup> $C_{cons,elec}$  = Consumo eléctrico neto EDAR x Precio energía eléctrica medio. (Considerando que por lo menos, la mitad de la demanda de energía eléctrica es cubierta con la cogeneración, se puede ajustar el consumo para usar la electricidad de la red en las horas más baratas).

<sup>9</sup> $C_{trans}$  = Coste del transporte del residuo desde donde se genera hasta la depuradora.

<sup>10</sup> $C_{amort}$  = Coste de amortización de los equipos que son necesarios para pretratar los residuos que funcionan como aditivos.

<sup>11</sup> $C_{TOTAL} = \sum \text{Costes} = C_{gest \text{ lodo}} + C_{cons. \text{ elec}} + C_{transporte} + C_{amortización}$

<sup>12</sup> $C_{unidad}$  = Coste por unidad de tratamiento.

<sup>13</sup> $C_{máx \text{ residuo}}$ : Coste máximo que deberían valer los aditivos para que el proceso fuera más rentable que sin aditivos.

Cuando el precio de compra/venta aparece como valor negativo significa que la operación no es rentable y que la EDAR tendría que cobrar como mínimo los valores indicados por la gestión del residuo. Si por el contrario, el precio de compra/venta aparece como valor positivo significa que se podrá pagar por el residuo hasta dicho precio, sin incrementar el coste operativo total calculado en la EDAR.

**Tabla 5.12.-** Tabla de costes/beneficios de la operación en la EDAR C, utilizando los residuos y concentraciones antes seleccionados.

Definición variable	Símbolo	Unidades	Blanco (con Lodo mixto) (Ver Tabla A.2.5)	Lodo+Deyecciones (Ver Tabla A.2.7)	Lodo+Matadero (Ver Tabla A.2.6)
Caudal de agua residual tratado en la EDAR	$Q_A$ <sup>1</sup>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	25.852	25.852	25.852
Caudal másico de lodo a digestión	$M_1$ <sup>2</sup>	kg·día <sup>-1</sup>	150.000	150.000	150.000
Caudal másico del aditivo a digestión	$M_2$ <sup>3</sup>	kg·día <sup>-1</sup>	-	296.053	4.488
Tiempo de retención hidráulico en digestión	TRH <sup>4</sup>	Días	23,31	7,8	22,8
Producción diaria de biogás	$V_{gas}$ <sup>5</sup>	Nm <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1.454	2.056	2.196
Energía eléctrica generada en cogeneración	$E_{elec,cog}$ <sup>6</sup>	kWh·día <sup>-1</sup>	5908	8.357	8.924
Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$ <sup>7</sup>	€·día <sup>-1</sup>	717	1.007	817
Coste consumo eléctrico (con autoconsumo)	$C_{cons,elec}$ <sup>8</sup>	€·día <sup>-1</sup>	522	289	235,26
Coste transporte residuos	$C_{trans}$ <sup>9</sup>	€·día <sup>-1</sup>	-	4456	75
Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{amort}$ <sup>10</sup>	€·día <sup>-1</sup>	-	0	45
<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$ <sup>11</sup>	€·día <sup>-1</sup>	1.238,44	5.739,14	1.163,34
Coste por unidad de tratamiento	$C_{UNIDAD}$ <sup>12</sup>	€·m <sup>-3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,048	0,222	0,045
Coste máximo compra/venta residuo	$C_{m\acute{a}x\ residuo}$ <sup>13</sup>	€·Tm <sup>-1</sup>	-	-7,62	5,00

<sup>1</sup> $Q_A$ : Caudal de agua residual que entra a la EDAR. <sup>2</sup> $M_1$ : Caudal de lodos que entra al digester. <sup>3</sup> $M_2$ : Caudal de aditivo.

<sup>4</sup>TRH: Tiempo de retención hidráulico.

<sup>5</sup> $V_{gas}$ : El biogás que se genera al día

<sup>6</sup> $E_{elect,cog}$  = (Potencia Instalada en la planta \* Horas funcionamiento)/365.

<sup>7</sup> $C_{gest,lodo}$  = Cantidad lodos \* Precio de gestión/Kg.

<sup>8</sup> $C_{cons,elec}$  = Consumo eléctrico neto EDAR \* Precio energía eléctrica medio. (Considerando que por lo menos, la mitad de la demanda de energía eléctrica es cubierta con la generación, por lo que la electricidad de la red se compra en las horas más baratas).

<sup>9</sup> $C_{trans}$  = Coste del transporte del residuo desde donde se genera hasta la depuradora.

<sup>10</sup> $C_{amort}$  = Coste de amortización de los equipos que son necesarios para pretratar los residuos que funcionan como aditivos.

<sup>11</sup> $C_{TOTAL}$  =  $\Sigma$ Costes =  $C_{gest\ lodo} + C_{cons.\ elec} + C_{transporte} + C_{amortización}$

<sup>12</sup> $C_{unidad}$  = Coste por unidad de tratamiento.

<sup>13</sup> $C_{m\acute{a}x\ residuo}$ : Coste máximo que deberían valer los aditivos para que el proceso fuera más rentable que sin aditivos.

Cuando el precio de compra/venta aparece como valor negativo significa que la operación no es rentable y que la EDAR tendría que cobrar como mínimo los valores indicados por la gestión del residuo. Si por el contrario, el precio de compra/venta aparece como valor positivo significa que se podrá pagar por el residuo hasta dicho precio sin incrementar el coste operativo total calculado en la EDAR

**Tabla 5.13.-** Tabla de costes/beneficios de la operación en la EDAR B, utilizando los residuos y concentraciones antes seleccionados.

Definición variable	Símbolo	Unidades	Blanco (con Lodo mixto) (Ver Tabla A.2.8)	Lodo+Residuo Industrial (Ver Tabla A.2.9)
Caudal de agua residual tratado en la EDAR	$Q_A$ <sup>1</sup>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	78.500	78.500
Caudal másico de lodo a digestión	$M_1$ <sup>2</sup>	kg·día <sup>-1</sup>	250.000	250.000
Caudal másico del aditivo a digestión	$M_2$ <sup>3</sup>	kg·día <sup>-1</sup>	-	55.600
Tiempo de retención hidráulico en digestión	TRH <sup>4</sup>	Días	24,40	20
Producción diaria de biogás	$V_{gas}$ <sup>5</sup>	Nm <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	2.988	4.305
Energía eléctrica generada en cogeneración	$E_{elec,cog}$ <sup>6</sup>	kWh·día <sup>-1</sup>	18.217	26.243
Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$ <sup>7</sup>	€/día	2.251	2.610
Coste consumo eléctrico (con autoconsumo)	$C_{cons,elec}$ <sup>8</sup>	€/día <sup>-1</sup>	1.784	1.022
Coste transporte residuos	$C_{trans}$ <sup>9</sup>	€/día <sup>-1</sup>	-	0
Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{amort}$ <sup>10</sup>	€/día <sup>-1</sup>	-	0
<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$ <sup>11</sup>	€/día <sup>-1</sup>	4.035,00	3.611,00
Coste por unidad de tratamiento	$C_{UNIDAD}$ <sup>12</sup>	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,051	0,046
Coste máximo compra/venta residuo para $C_{TOTAL} = C_{TOTAL}$ actual	$C_{m\acute{a}x\ residuo}$ <sup>13</sup>	€/Tm <sup>-1</sup>	-	2,20

<sup>1</sup> $Q_A$ : Caudal de agua residual que entra a la EDAR. <sup>2</sup> $M_1$ : Caudal de lodos que entra al digestor. <sup>3</sup> $M_2$ : Caudal de aditivo.

<sup>4</sup>TRH: Tiempo de retención hidráulico.

<sup>5</sup> $V_{gas}$ : El biogás que se genera al día

<sup>6</sup> $E_{elec,cog}$ = (Potencia Instalada en la planta x Horas funcionamiento)/365.

<sup>7</sup> $C_{gest,lodo}$ = Cantidad lodos (kg) x Precio de gestión/Kg.

<sup>8</sup> $C_{cons,elec}$  = Consumo eléctrico neto EDAR x Precio energía eléctrica medio. (Considerando que por lo menos, la mitad de la demanda de energía eléctrica es cubierta con la cogeneración, se puede ajustar el consumo para usar la electricidad de la red en las horas más baratas).

<sup>9</sup> $C_{trans}$ = Coste del transporte del residuo desde donde se genera hasta la depuradora.

<sup>10</sup> $C_{amort}$ = Coste de amortización de los equipos que son necesarios para pretratar los residuos que funcionan como aditivos.

<sup>11</sup> $C_{TOTAL} = \sum Costes = C_{gest\ lodo} + C_{cons.\ elec} + C_{transporte} + C_{amortización}$

<sup>12</sup> $C_{unidad}$ = Coste por unidad de tratamiento.

<sup>13</sup> $C_{m\acute{a}x\ residuo}$ : Coste máximo que deberían valer los aditivos para que el proceso fuera más rentable que sin aditivos.

Cuando el precio de compra/venta aparece como valor negativo significa que la operación no es rentable y que la EDAR tendría que cobrar como mínimo los valores indicados por la gestión del residuo. Si por el contrario, el precio de compra/venta aparece como valor positivo significa que se podrá pagar por el residuo hasta dicho precio, sin incrementar el coste operativo total calculado en la EDAR

### 5.2.2.- Estudio del proceso de digestión anaerobia en semicontinuo con residuo industrial.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de co-digestión en semicontinuo a escala piloto con lodos de la EDAR B y residuo industrial, así como el análisis de los mismos.

#### 5.2.2.1.- Producción de Biogás.

La producción volumétrica diaria de biogás para el digestor Blanco (lodo digerido y lodo mixto) y para el digestor Ensayo (lodo mixto y residuo industrial) se representa en la Figura 5.23. En ella se indican las dos fases llevadas a cabo en el proceso. En la Fase I, la alimentación de ambos digestores se realiza únicamente con el lodo digerido y con lodo mixto, siendo sus producciones de biogás elevadas en comparación con la semana siguiente donde se produce un descenso. La elevada producción durante la primera semana se atribuye a las bacterias presentes en el lodo digerido, ya que son forzadas a mantenerse sin alimento durante los 3 días correspondientes a la desgasificación del lodo digerido (fase cero), y, por lo tanto, la adición de lodo mixto posterior supone un aumento de la capacidad metabólica de las mismas, con la consiguiente transformación de la materia orgánica adicionada en biogás.

Durante la Fase II, el digestor blanco es alimentado sólo con lodo mixto, mientras que el digestor ensayo es alimentado además con residuo industrial. En este caso, se observa un incremento gradual en la producción de biogás al aumentar la carga orgánica de alimentación en el digestor ensayo, diferenciándose del digestor blanco por el incremento de la materia orgánica añadida con el residuo industrial.

Los aumentos de carga del residuo en el digestor ensayo son realizados cada 7 días, provocando los picos que se observan en la gráfica. Los valores promedio de producción de biogás obtenidos por semana y los incrementos de carga de los nutrientes quedan reflejados en la Tabla 5.14. En dicha tabla se aprecia que, a excepción de la S1, la producción de biogás por gSV alimentado no oscila mucho

en el digester blanco, entre 0,18 y 0,20  $L_{\text{gas}}/g_{\text{SV}_{\text{alim}}}$ , indicando una correcta estabilización del sistema. En el caso del digester ensayo, la estabilización del proceso se observa una semana después, con valores entre 0,33 y 0,39  $L_{\text{gas}}/g_{\text{SV}_{\text{alim}}}$ . al final del experimento.

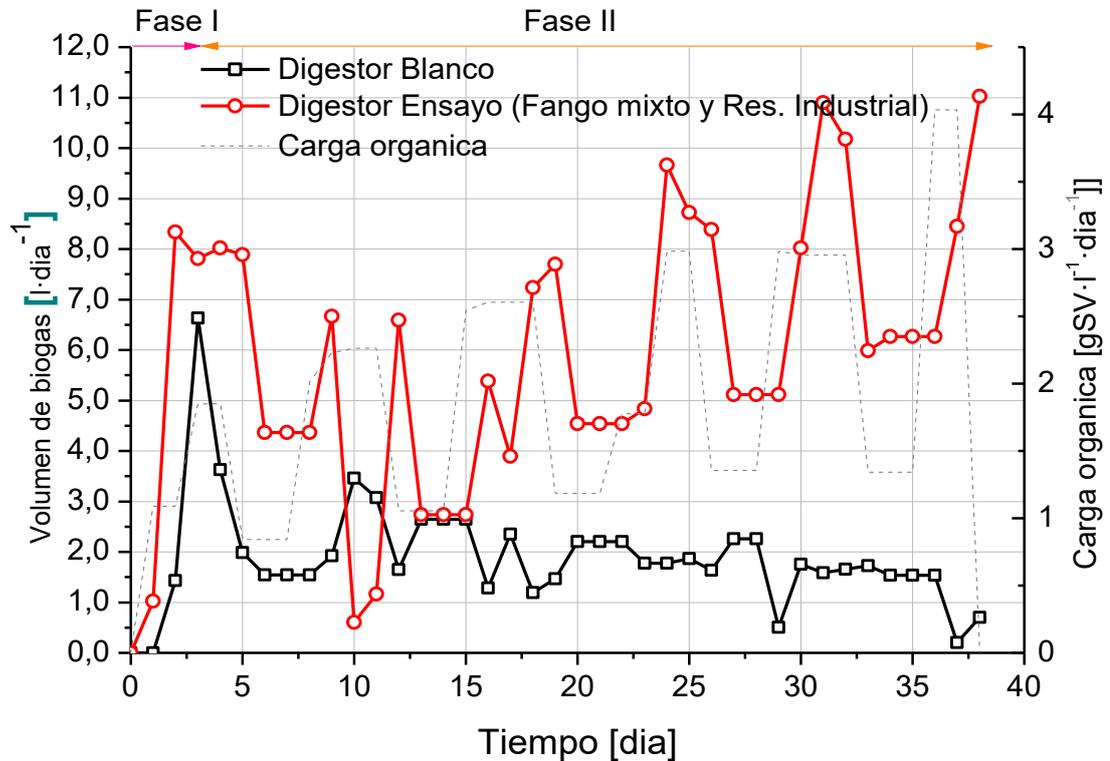
Los valores de biogás obtenidos en el reactor ensayo en la Semana 1, correspondiente al arranque del sistema, así como los obtenidos en la Semana 6 no son representativos, debido a que en la Semana 6 se aumenta la carga con el fin de llegar al límite de operación del reactor.

En la Figura 5.23 se observa cómo en el día 10 la producción de biogás en el digester alimentado con lodo mixto y residuo industrial decae bruscamente, obteniéndose un volumen de biogás de 0,60 L/día frente a los 6,6 L/día que en ese momento se estaban alcanzando. Dicho descenso es un indicativo de mal comportamiento del equipo, de forma que, tras examinar los parámetros influyentes en el proceso, se han encontrado valores de concentración de metano (Figura 5.24) inferiores a los obtenidos en el digester alimentado solo con lodo mixto, causado probablemente por una mala estanqueidad del sistema. Efectivamente, se apreciaron indicios de entrada de aire y se procedió inmediatamente a su completa inertización con  $N_2$ , evitando así cualquier tipo de problema durante el resto de los ensayos. Tras la inertización, el sistema se ha recuperado con facilidad, tal y como puede observarse en dicha Figura 5.23, manteniéndose la producción de biogás del digester ensayo sin incidencias a lo largo de toda la experimentación. Como parámetro indicativo, a partir de este momento, los valores de producción de metano en cada uno de los digestores son estables hasta el final del ensayo.

**Tabla 5.14.-** Datos promedio de producción de biogás obtenidos en los digestores alimentados con lodo mixto y lodo mixto + residuo industrial, de la EDAR B, cada semana de trabajo.

Semanas		1	2	3	4	5	6
	Reactor	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio
<b>Carga SV (gsv/L<sub>alim</sub>·día)</b>	L <sub>mixt</sub>	0,79	1,49	1,39	1,25	1,05	1,44
	L <sub>mixt</sub> + RI	1,37	1,78	1,88	2,11	2,15	4,03
<b>Producción biogás diaria (L/día)</b>	L <sub>mixt</sub>	2,81	2,58	1,84	1,72	1,63	0,81
	L <sub>mixt</sub> + RI	6,14	3,32	5,40	6,70	7,94	8,58
<b>Volumen Biogás acumulado (L)</b>	L <sub>mixt</sub>	13,96	28,60	43,23	56,50	67,14	73,03
	L <sub>mixt</sub> + RI	33,48	60,31	91,60	131,62	179,38	212,55
<b>Producción Biogás (L<sub>gas</sub>/gsv<sub>alim</sub>)</b>	L <sub>mixt</sub>	0,35	0,20	0,16	0,17	0,18	N.A.
	L <sub>mixt</sub> + RI	0,51	0,23	0,33	0,38	0,39	N.A.
<b>Producción Biogás (L<sub>gas</sub>/gsv<sub>elim</sub>)</b>	L <sub>mixt</sub>	0,43	0,31	0,35	0,43	0,46	N.A.
	L <sub>mixt</sub> + RI	0,89	0,38	0,50	0,65	0,47	N.A.
<b>Producción de Biogás (L/L<sub>alim</sub>·día)</b>	L <sub>mixt</sub>	0,28	0,26	0,18	0,17	0,16	0,08
	L <sub>mixt</sub> + RI	0,61	0,33	0,54	0,67	0,79	0,86

\*Todos los lodos mixtos proceden de la EDAR B.



**Figura 5.23.-** Producción diaria volumétrica de biogás de los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + residuo industrial.

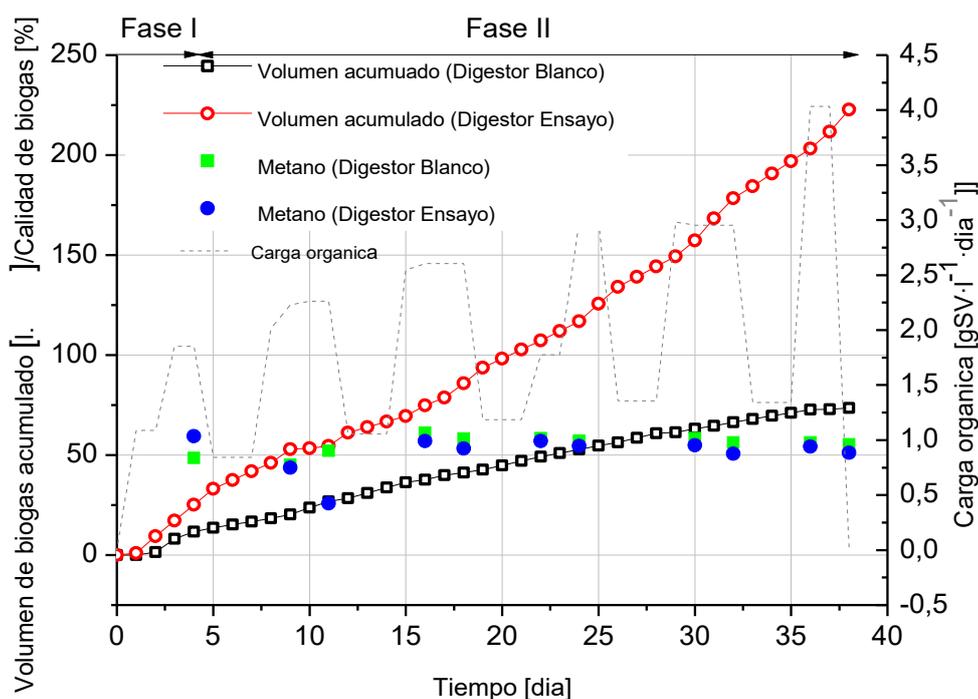
Como el Digestor Blanco (digestor en el que se introduce el lodo digerido al principio del ensayo, y diariamente se alimenta sólo con lodo mixto) no se alimenta con residuo industrial, la carga orgánica de alimentación no aumenta; por ello, y para evitar el envejecimiento del lodo mixto se procede a la renovación del mismo semanalmente, con lodo mixto de la EDAR B.

Como consecuencia de los cambios de muestras de lodo mixto semanales en la alimentación a los digestores, y como cada lodo posee distintas concentraciones de ST y SV, para mantener el mismo caudal de alimentación de los digestores a lo largo del ensayo, se ha intentado con estas adiciones que la carga orgánica tenga variaciones mínimas.

En la Figura 5.23 se aprecia que el digestor blanco muestra una reducción en el rendimiento de producción de biogás tras la primera semana, estabilizándose posteriormente hasta el final del ensayo. Este aspecto se confirma mediante los

resultados de producción de biogás promedio, respecto a la materia orgánica alimentada, mostrados en la Tabla 5.14, donde para la semana 1 es de 0,35  $L_{gas}/gSV_{alim}$ , y para el resto varían entre 0,20 y 0,16  $L_{gas}/gSV_{alim}$ .

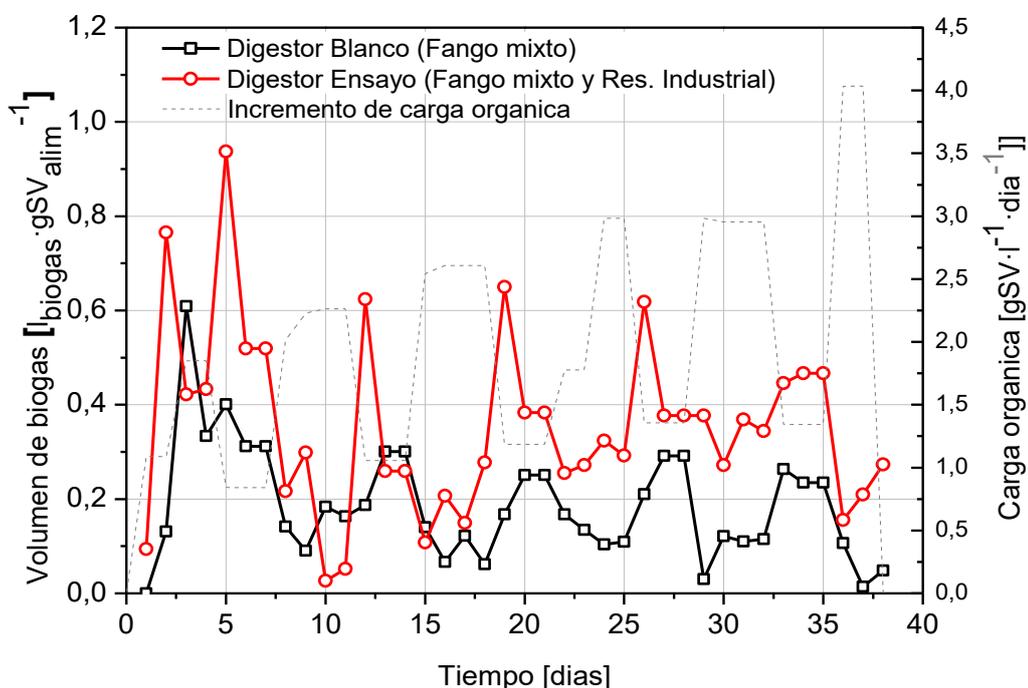
En cuanto al digester de ensayo, la carga orgánica se incrementa continuamente en 6 intervalos desde 1,37  $gsv/L\cdot día$  (Fase I) hasta 4,03  $gsv/L\cdot día$  (máximo valor ensayado en la Fase II). El aumento de carga en el digester ensayo lleva consigo un aumento en la producción diaria de biogás, y por lo tanto su volumen final acumulado de biogás ascendió a 212 litros en 38 días de experimentación frente a 73 litros generados en el digester alimentado únicamente con lodo mixto (Figura 5.24).



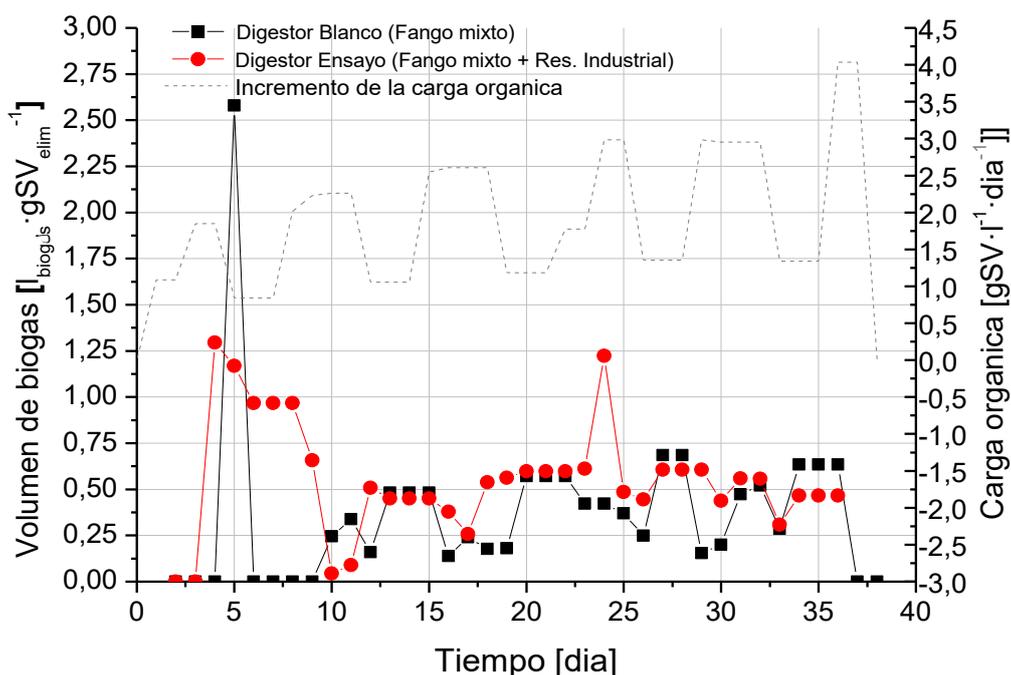
**Figura 5.24.-**Volumen de biogás acumulado y % en riqueza de  $CH_4$  en los digestores alimentados con lodo mixto y lodo mixto + residuo industrial.

En la Figura 5.25 se muestra el volumen de biogás producido en función de los SV alimentados al sistema. En general, una vez estabilizados ambos procesos, el digester ensayo muestra un mayor rendimiento específico, conforme a la diferencia

entre las cargas de alimentación de ambos sistemas (ver Tabla 5.14). En la Figura 5.26 se muestra el volumen de biogás producido, en este caso en función de los SV eliminados. En ella puede observarse, igualmente, cómo en los dos digestores, se produce la estabilización del sistema a partir de la primera semana (digestor blanco) y la segunda (digestor ensayo), permaneciendo prácticamente constante durante el resto del ensayo. También se observa cómo, en general, existe poca diferencia entre ambos sistemas, al ser los rendimientos bastante parecidos, aunque en líneas generales son algo superiores en el caso del digestor ensayo (ver Tabla 5.14). Esto último indica que la diferencia en el rendimiento de producción de biogás de ambos sistemas no es solo debida a la diferencia en las cargas aplicadas, sino también a la diferente composición de los SV alimentados, o lo que es lo mismo, la mezcla lodo mixto-residuo industrial tiene una mayor potencia de metanización que el lodo mixto por sí solo, particularmente en las proporciones estudiadas.

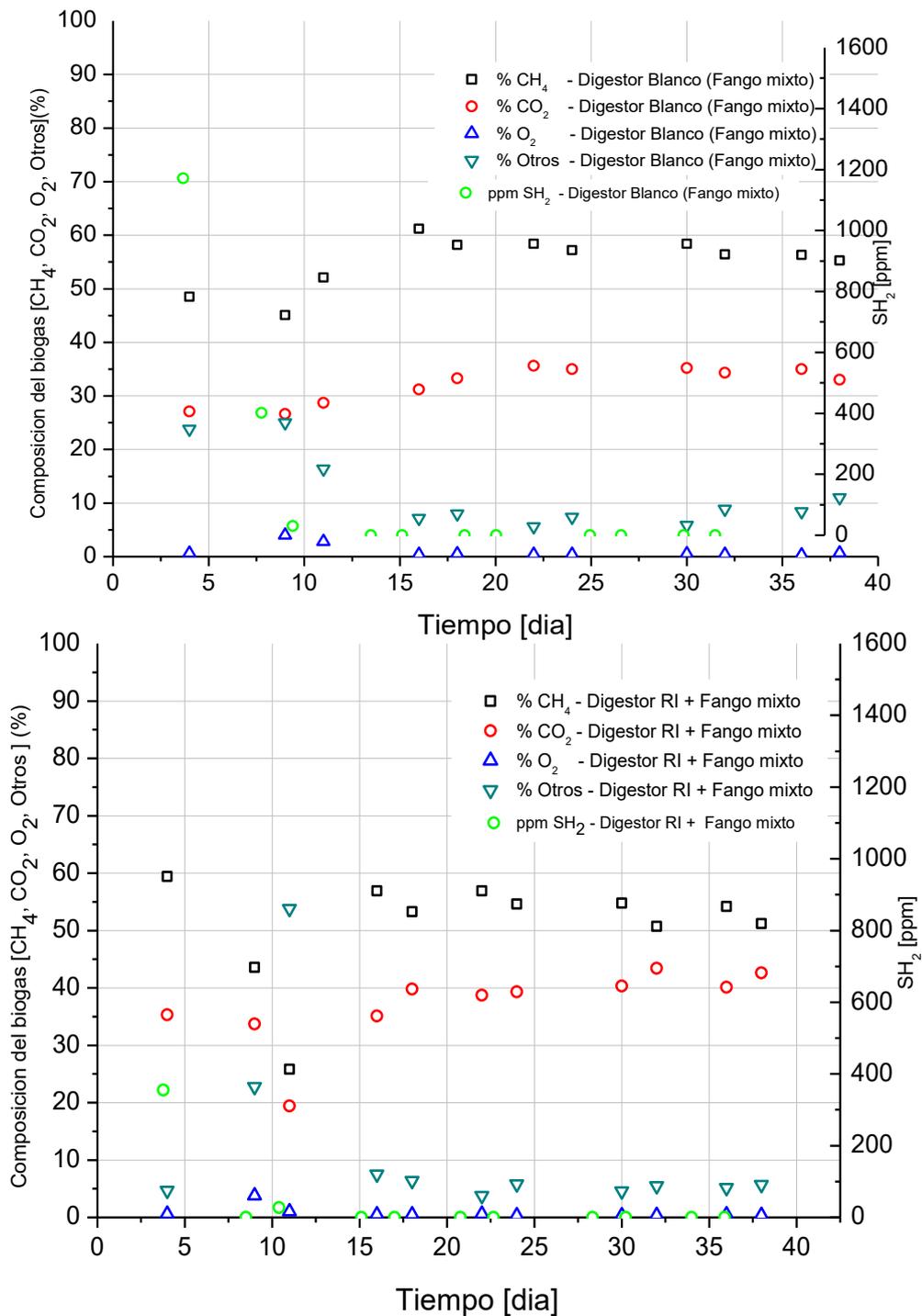


**Figura 5.25.-** Volumen de biogás producido por g SV alimentado en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + residuo industrial.



**Figura 5.26.-** Volumen de biogás producido por g SV eliminado en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + residuo industrial.

La composición del biogás generado ha comenzado a medirse a partir del día 4 de operación, siendo el promedio de metano en el digestor alimentado con lodo mixto del 55,19% y de 51,03% para el alimentado con lodo mixto + residuo industrial, respectivamente. En la Figura 5.27 se muestra la composición del biogás generado según su porcentaje en CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y otros (H<sub>2</sub>, compuestos organosulfurados, siloxanos, etc.) y su concentración en ppm de SH<sub>2</sub>, resultando ser la composición del biogás muy similar en ambos digestores.



**Figura 5.27.-** Composición del biogás (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, SH<sub>2</sub> y otros) en los digestores alimentados con fango mixto (arriba) y fango mixto + residuo industrial (abajo).

La composición habitual aproximada de biogás procedente de una EDAR con proceso digestivo anaerobio normal es aproximadamente de 63% CH<sub>4</sub>; 39% CO<sub>2</sub>; 0,15 % O<sub>2</sub>. Por tanto, podemos ver que los valores de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> obtenidos en estos ensayos piloto de co-digestión en semicontinuo no difieren en exceso de los valores

de referencia del biogás generado en las EDAR. Los valores de CH<sub>4</sub> en ambos digestores son ligeramente menores si se comparan con estas composiciones estándares citadas.

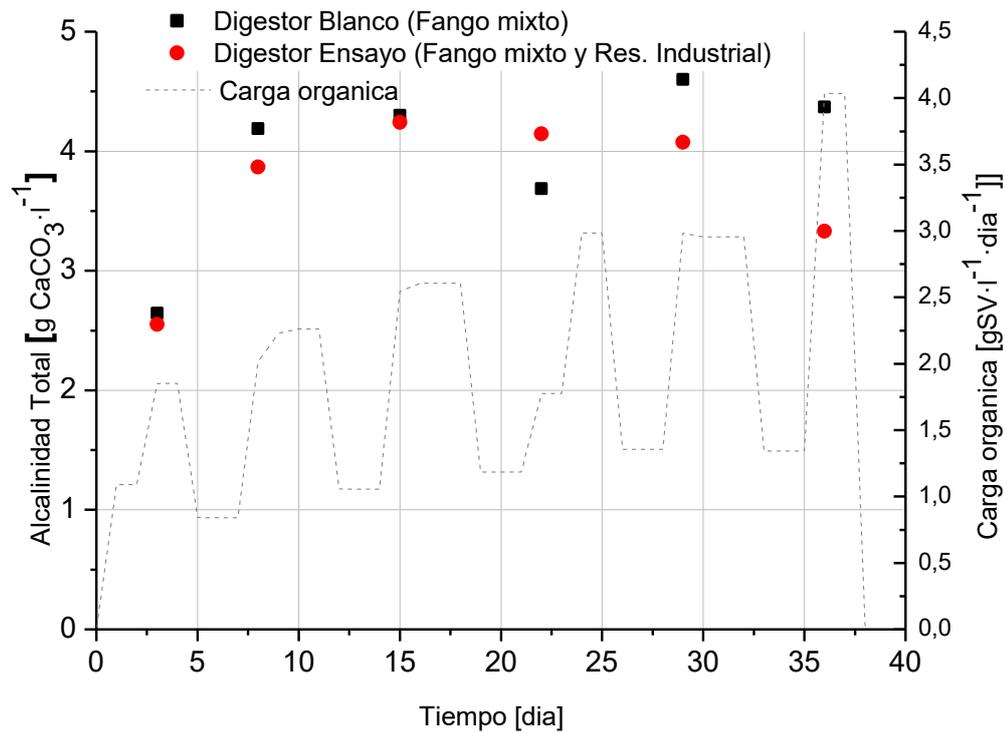
#### 5.2.2.2- Parámetros de control.

##### a) Alcalinidad total.

La alcalinidad es una medida de la capacidad tampón del medio. En el rango de pH de estos procesos de digestión anaerobia, valores superiores a 2,50 g<sub>CaCO3</sub>/L, equivalentes, aseguran un buen control del pH y una adecuada estabilidad del sistema.

En los análisis realizados destinados a la caracterización de los componentes de alimentación, se han medido los valores de alcalinidad total en el rango de 1,21 a 5,79 g<sub>CaCO3</sub>/L para los diferentes lotes de lodo mixto y de 0,09 g<sub>CaCO3</sub>/L en el caso del residuo industrial.

En la Figura 5.28 se han representado los valores de alcalinidad de ambos digestores. En el digestor considerado como blanco, la adición diaria de lodo mixto, con una alcalinidad que se encuentra dentro del rango anterior, da lugar a valores de alcalinidad entre 2,64 y 4,30 g<sub>CaCO3</sub>/L, manteniéndose además prácticamente constante a lo largo del ensayo. En el digestor ensayo los valores de alcalinidad se sitúan también en el rango similar 2,55-4,24 g<sub>CaCO3</sub>/L, valores que se encuentran en el entorno de los del digestor blanco, ya que prácticamente la totalidad de la alcalinidad es aportada por el lodo mixto. Por tanto, dichas concentraciones son suficientemente elevadas para mantener la estabilidad en el sistema, como así ha ocurrido en la experimentación.

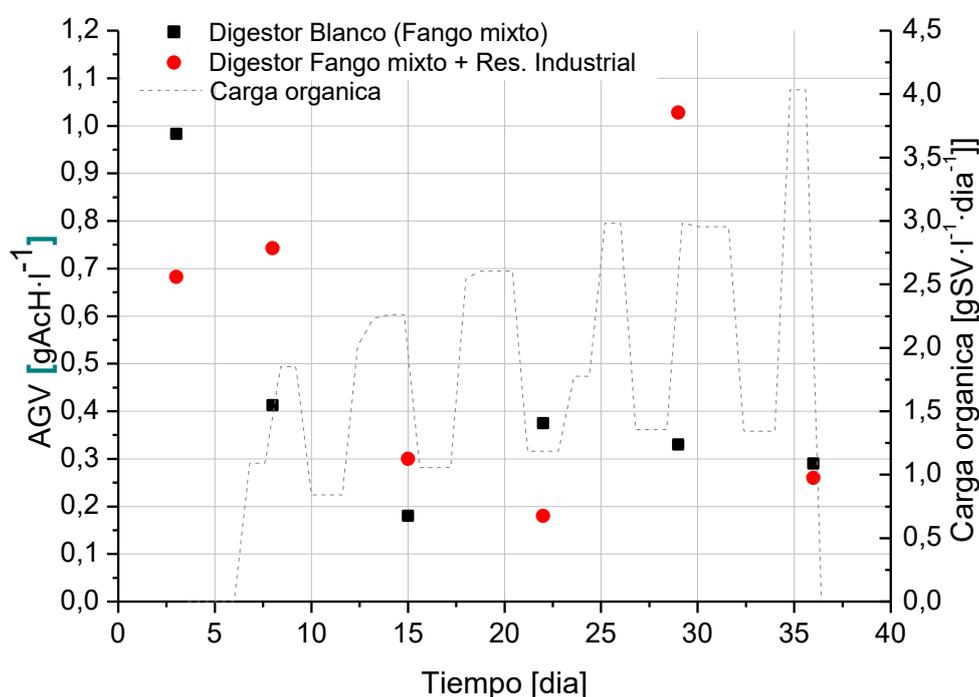


**Figura 5.28.-** Valores de alcalinidad total en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + residuo industrial.

b) Ácidos grasos volátiles.

Otro de los parámetros esenciales de control del proceso es la medida de la concentración de ácidos grasos volátiles. Su importancia radica en el hecho de ser los productos intermedios más importantes en los procesos de digestión. Para poder determinar si el sistema está sufriendo inhibición, debe controlarse la concentración de AGV, tanto en la etapa inicial, como durante la etapa de mayor estabilidad del sistema. Un aumento o disminución brusca de la concentración de AGV es considerado como síntoma de una posible inhibición del proceso. Concentraciones elevadas de AGV generarían un descenso en el pH produciéndose la acidificación del reactor. Dicha inhibición puede ser causada por la acumulación de AGV que tiene lugar cuando las bacterias acidogénicas producen AGV a una tasa mayor a la de su consumo por las bacterias metanogénicas.

En la Figura 5.29, se muestran las concentraciones de AGV medidas a lo largo de los ensayos. Es destacable cómo en ambos digestores el contenido en AGV se mantiene medianamente estable a partir del día 10 de ensayo. El máximo valor se alcanzó de forma puntual en el digester de ensayo el día 29, siendo el contenido en AGV superior a  $1000 \text{ mg}_{\text{AcH}} \cdot \text{L}^{-1}$ . Dicho aumento no fue continuado y el sistema se estabilizó en 1 semana, sin aparecer alteraciones sobre el resto de parámetros medidos.



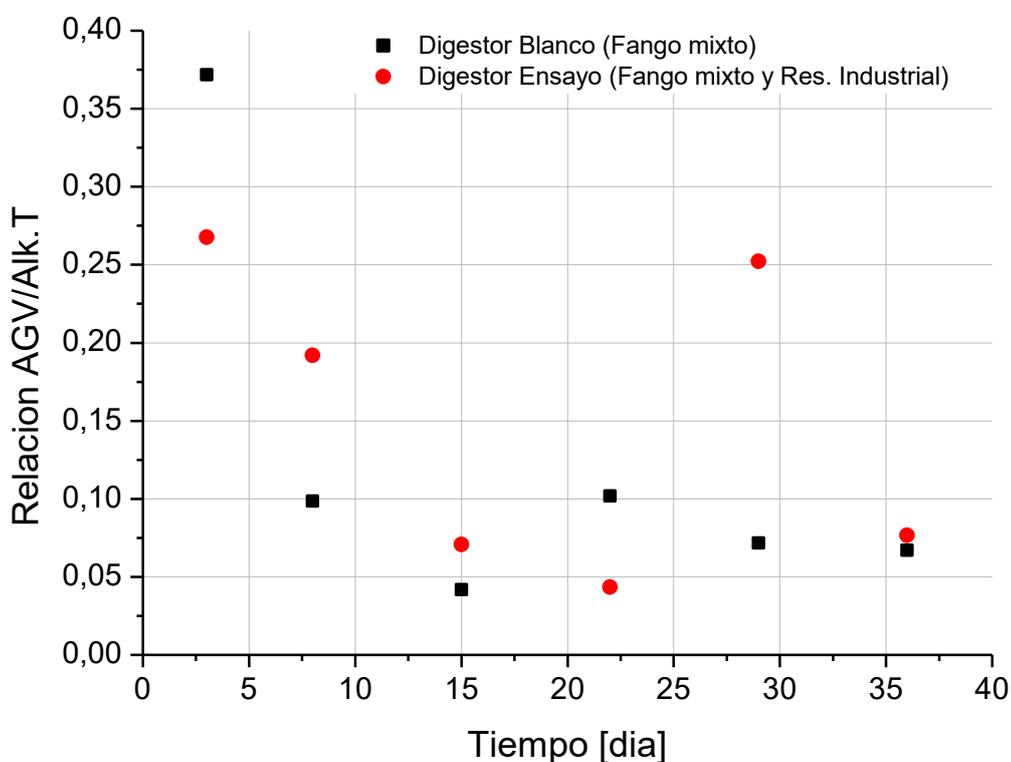
**Figura 5.29.-** Concentración de AGV en los digestores alimentados con lodo (o fango) mixto y lodo o fango mixto + residuo industrial.<sup>2</sup>

Para verificar el correcto funcionamiento del sistema, otro de los factores fundamentales es la medida de la relación  $\text{AGV}/\text{ALK}_T$ . Se considera que cuando la relación se acerca a valores de 0,80, o superiores, el digester comienza a acidificarse. En nuestro caso, los valores medidos de la relación  $\text{AGV}/\text{ALK}_T$  se encuentran entre 0,04 y 0,37, respectivamente.

<sup>2</sup> En el digester blanco hay mezcla de fango (o lodo) digerido y mixto. En el digester ensayo hay mezcla de fango (o lodo) digerido, mixto, y residuo industrial.

Estos valores son bastantes inferiores a los de inhibición consultados en la bibliografía, verificándose junto con valores de pH entre 6-8 el perfecto funcionamiento del sistema.

La necesidad de una elevada capacidad tampón del sistema conlleva una baja relación  $AGV/ALK_T$  con valores óptimos situados entre 0,00-0,10. En la Figura 5.30, se observa como en la Fase II de ensayo, exceptuando la primera semana, en la cual se produce la estabilización del sistema, las relaciones  $AGV/ALK_T$  obtenidas se corresponden con las apropiadas para el correcto funcionamiento del sistema.



**Figura 5.30.-** Relación  $AGV/ALK_T$  en los digestores alimentados con lodo mixto y lodo mixto + residuo industrial.

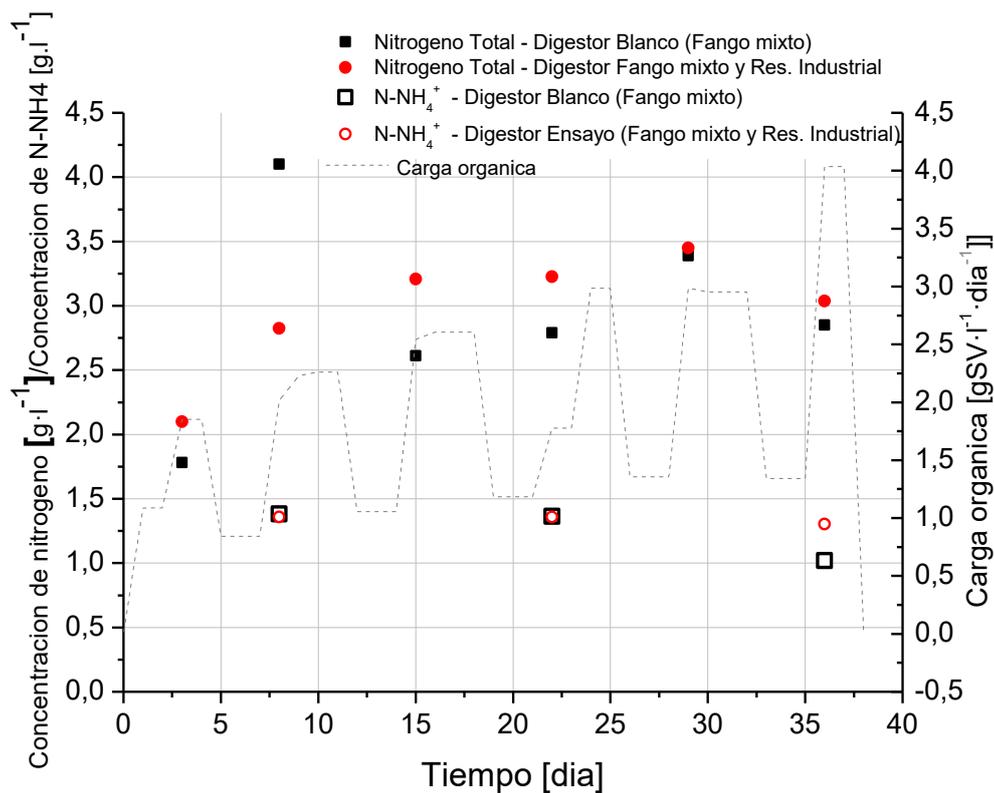
c) Nitrógeno total amoniacal.

Durante el proceso de digestión anaerobia, el nitrógeno orgánico es degradado dando lugar a formas amoniacaes. El nitrógeno amoniacal es la suma del ion amonio ( $NH_4^+$ ) y del amoníaco ( $NH_3$ ), determinando el pH del medio la

concentración relativa de cada una de estas dos especies en equilibrio y, como consecuencia de ello, la toxicidad del mismo.

Para prevenir posibles inhibiciones es fundamental el control, durante el ensayo, de la concentración de  $\text{NH}_4^+$  en ambos digestores. En la Figura 5.31 se puede observar que las concentraciones de nitrógeno amoniacal no superan, en ningún caso, 1,4 g/L, siendo éstas inferiores al límite de inhibición referenciado por algunos autores ( $2,5 \text{ g N-NH}_4^+/\text{L}$ ) [1].

Ligada a la concentración de  $\text{N-NH}_4^+$  se encuentra la concentración de nitrógeno total. En el lodo digerido, el nitrógeno total ( $\text{N}_T$ ) está formado por nitrógeno orgánico (proteínas, aminoácidos, etc.) y por nitrógeno amoniacal. En este caso, ambos reactores son operados bajo similares concentraciones de nitrógeno total, situándose en un rango estable de concentración entre 3,0-3,5 g/L, siendo escasa la diferencia entre los valores medidos en el digestor de ensayo y el blanco, debido ésta a la adición del residuo industrial, ya que, aunque éste posee un bajo contenido en nitrógeno total, es suficiente para que sus valores se diferencien del digestor alimentado con lodo mixto.

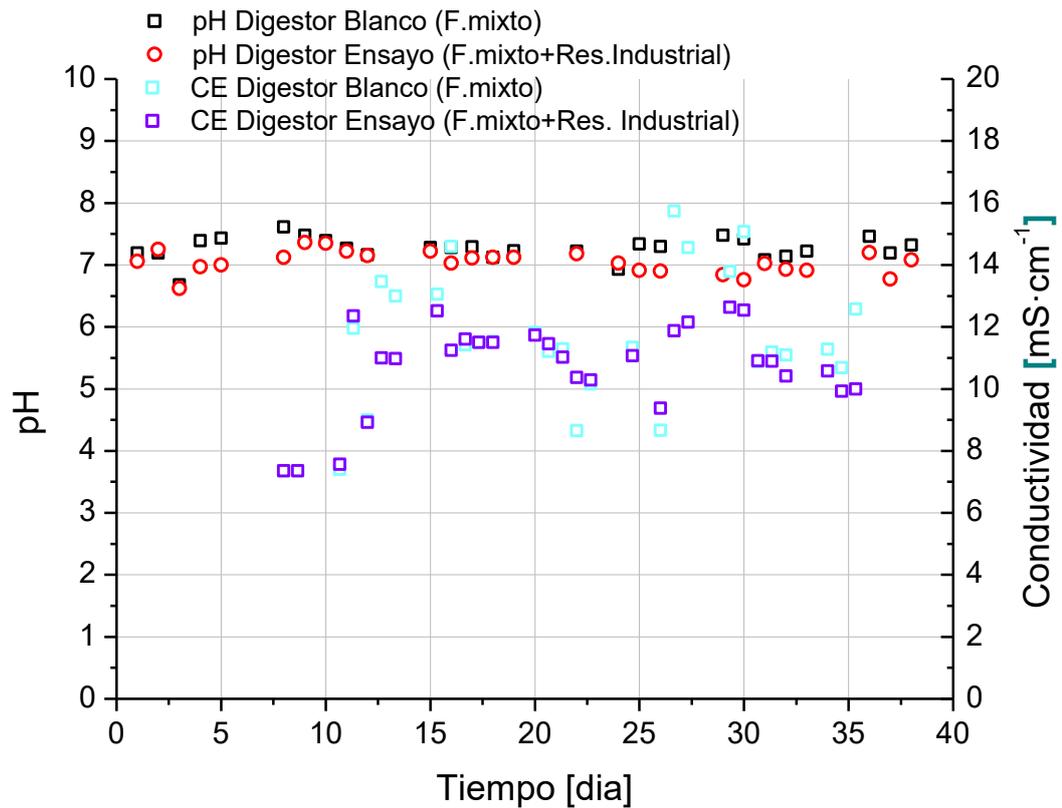


**Figura 5.31.-** Concentración de nitrógeno total y nitrógeno amoniacal en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + residuo industrial.

#### d) pH y Conductividad Eléctrica.

El pH en el interior de ambos digestores se ha mantenido en el intervalo 6,5-7,5 a lo largo de todo el ensayo (Figura 5.32). En ambos casos, los valores obtenidos se sitúan dentro del rango óptimo para el desarrollo de cualquier proceso de digestión anaerobia.

En cuanto a la conductividad eléctrica, su rango ha sido entre 8,5-16 mS·cm<sup>-1</sup> en ambos digestores, siendo el máximo obtenido en el digestor ensayo de 12,63 mS·cm<sup>-1</sup>. Dichos valores son considerados dentro de la normalidad, y, por lo tanto, no han tenido influencia negativa en el proceso.



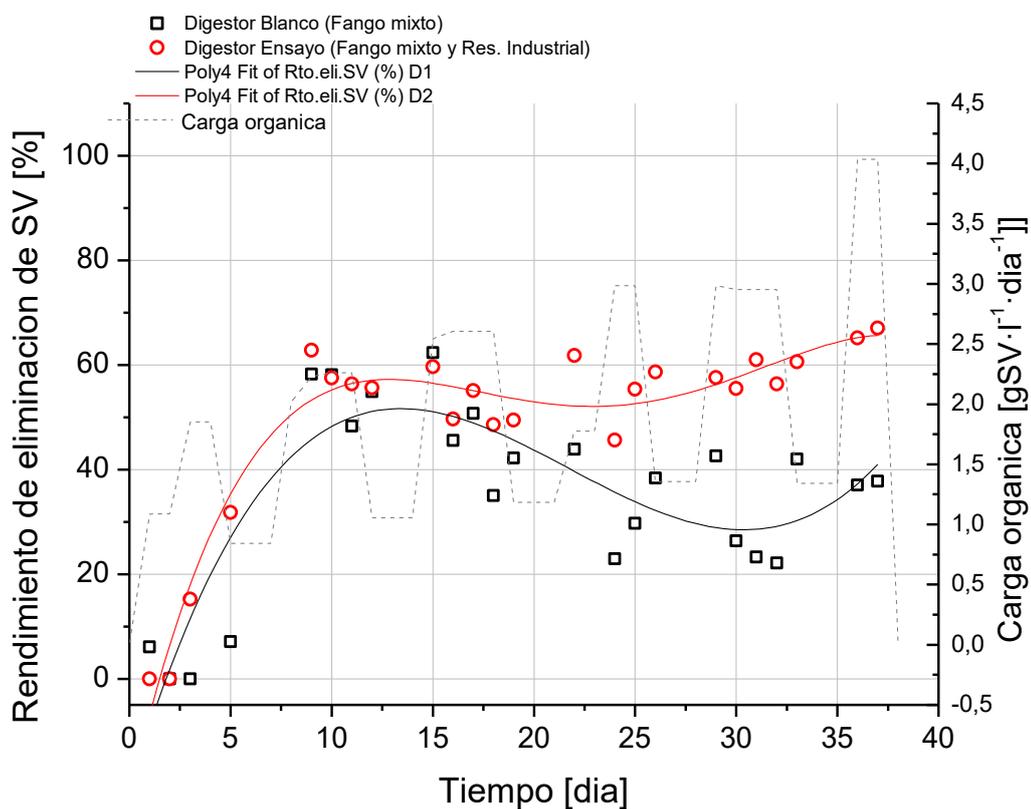
**Figura 5.32.-** Relación pH y conductividad eléctrica en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + residuo industrial.

e) Rendimiento de eliminación de materia orgánica.

En los procesos anaerobios, un incremento en la carga orgánica de alimentación normalmente supone un incremento en el rendimiento de producción de biogás, existiendo, sin embargo, un límite de carga orgánica por encima del cual la producción de biogás podría descender bruscamente. Este óptimo de producción de biogás suele coincidir con unos porcentajes de reducción de sólidos volátiles (SV) comprendidos entre el 40 y el 60%, y unos tiempos de residencia normalmente no inferiores a 10 días. Por lo tanto, la optimización de la producción de biogás en cualquier proceso anaerobio pasa por encontrar el punto de carga de alimentación con la que se obtiene la máxima producción de metano, pero sin llegar a sobrecargar el sistema.

En la Figura 5.33 se representa el porcentaje de eliminación de sólidos volátiles, donde se aprecia una tendencia ascendente al aumentar la carga orgánica de

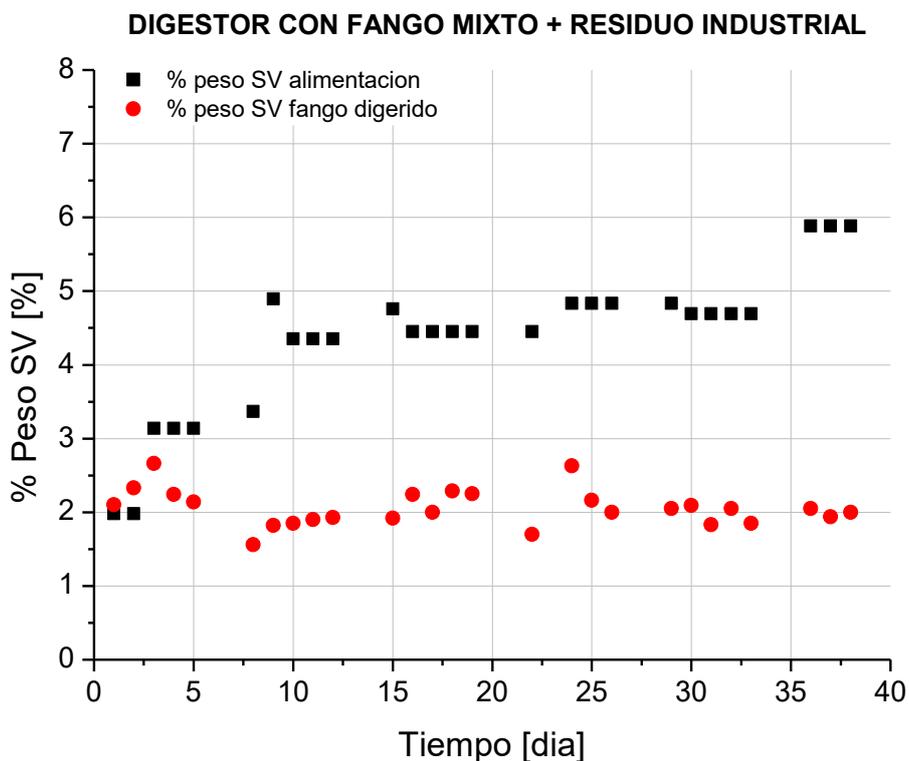
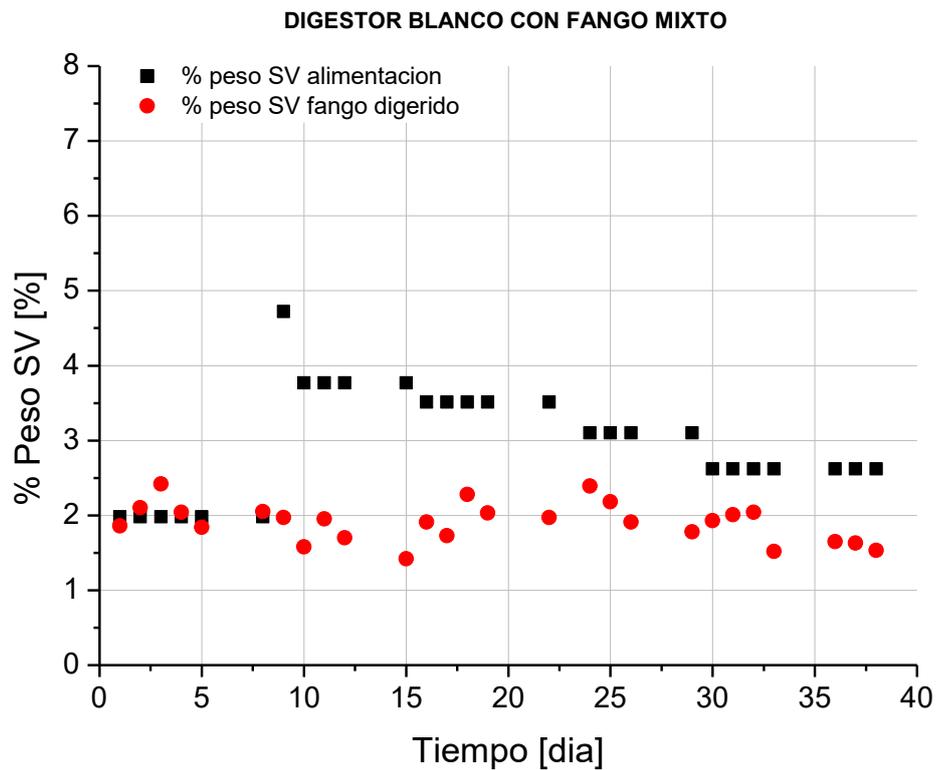
alimentación en el digester de ensayo. Es decir, en el rango de cargas estudiado, a mayor cantidad de materia orgánica alimentada diariamente mayor porcentaje de dicha materia es eliminado. En el caso del digester blanco la tendencia de eliminación de materia orgánica fluctúa en mayor medida debido a la variabilidad de las propiedades del lodo de entrada. La ecuación polinómica para el digester ensayo es:  $-0,0004x^4 + 0,0352x^3 - 1,2065x^2 + 16,701x - 22,701$  con  $R^2 = 0,9413$ . La ecuación polinómica para el digester blanco es:  $0,0008x^4 - 0,0528x^3 + 0,7495x^2 + 3,3755x - 5,3851$  con  $R^2 = 0,9246$  por lo que el grado de ajuste en ambas gráficas se considera que es bueno.



**Figura 5.33.-** Rendimiento de eliminación de sólidos volátiles (SV) en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + residuo industrial. Ajuste polinómico (grado 4) de los datos obtenidos a lo largo del ensayo.

También se observa en la Figura 5.33, cómo durante la primera y la segunda semana de ensayo el rendimiento de eliminación de sólidos volátiles es muy similar en ambos digestores, diferenciándose ambos a partir del día 20. También es

destacable el aumento producido en el rendimiento de eliminación de SV en el reactor de ensayo al aumentar la carga orgánica del sistema, en contraposición al descenso producido en el rendimiento en el reactor utilizado como blanco durante el transcurso del ensayo. Este aspecto puede observarse en la Figura 5.34 mediante la representación de las concentraciones de sólidos volátiles en alimentación y lodo digerido de ambos digestores.

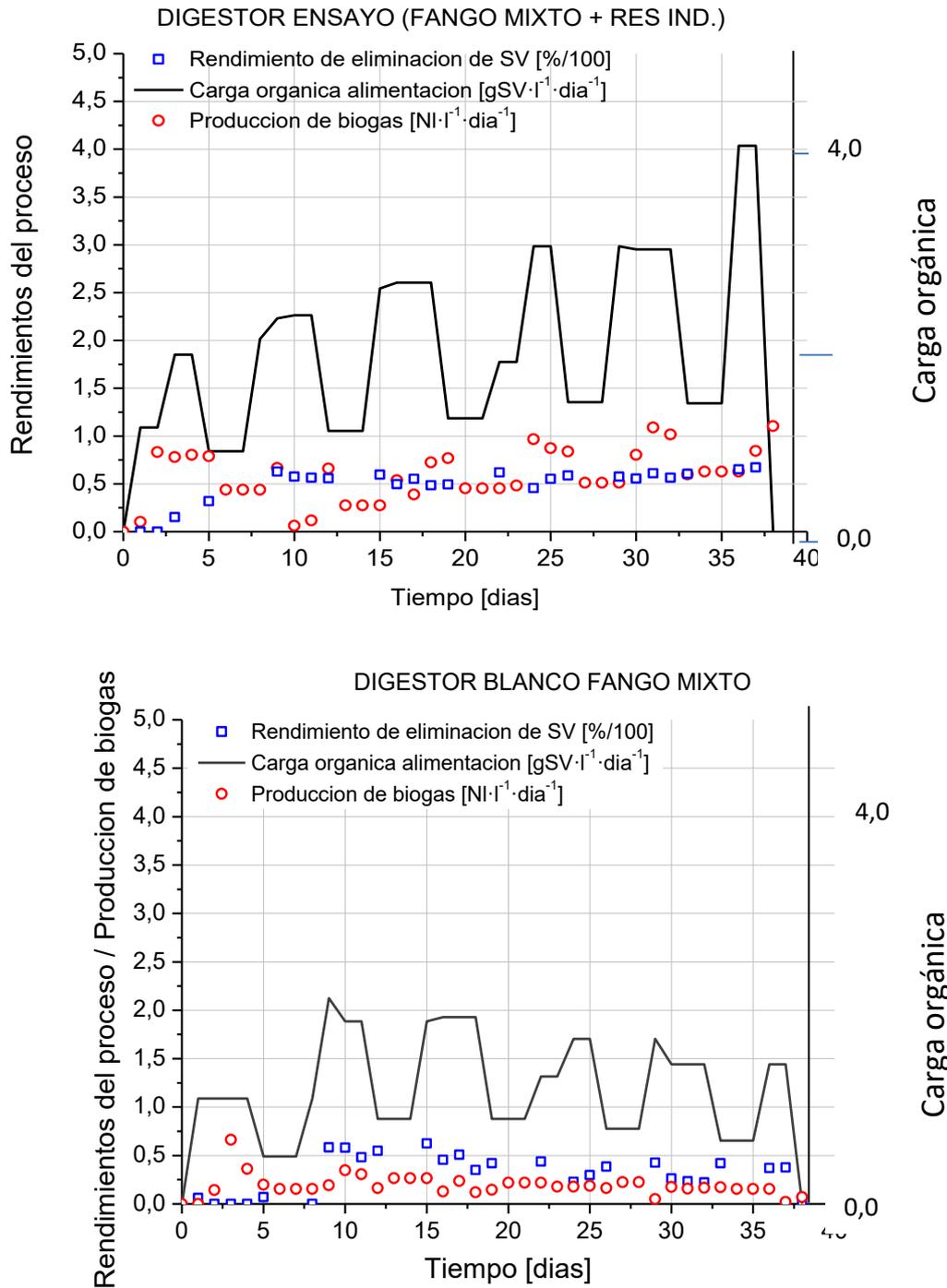


**Figura 5.34.-** Concentración de SV en alimentación y lodo digerido para los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + residuo industrial.

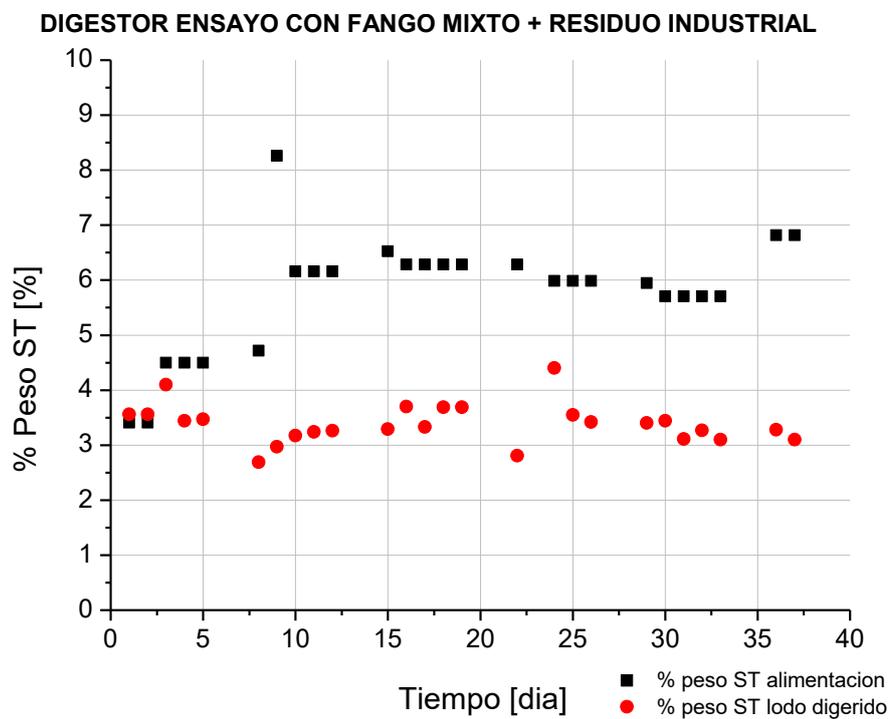
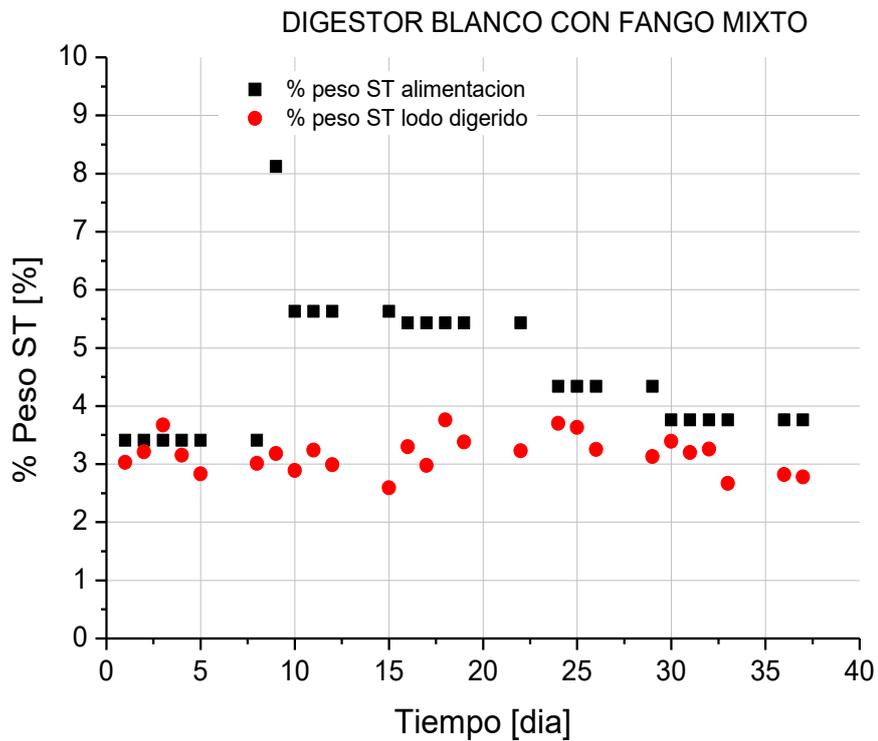
En la Figura 5.34 se observan concentraciones de SV en la alimentación superiores en el caso del digestor ensayo comparado con el digestor blanco, debido a la incorporación del residuo industrial, así como concentraciones similares de SV en el digestato de ambos digestores. Ello indica, por tanto, que el aumento en la tasa de degradación de SV compensa el incremento en la cantidad alimentada de materia orgánica.

Los rendimientos de eliminación de SV y producción de biogás en función de la carga orgánica de alimentación (OLR), para ambos digestores, se muestran en la Figura 5.35. En el caso del digestor alimentado solo con lodo mixto se observan valores constantes, tanto en la producción de biogás, como en el rendimiento de eliminación de volátiles, causados por el valor constante de la carga orgánica diaria. Sin embargo, la adición de residuo industrial, da lugar a mayores producciones de biogás, así como un incremento de eliminación de materia orgánica, al aumentar ésta.

El siguiente aspecto a considerar es la concentración de sólidos totales (ST) en el lodo digerido, ya que, si la adición de residuo industrial al digestor supone un incremento en los mismos, también supondrá una mayor producción de lodos a deshidratar, y posteriormente gestionar, con el consiguiente aumento de costes. La Figura 5.36 presenta las concentraciones de ST en la alimentación y digestato de ambos digestores. Comparando ambas gráficas se observa que, aunque el porcentaje de ST de alimentación es superior en el digestor ensayo, la concentración en el digestato es similar en ambos sistemas.



**Figura 5.35.-** Rendimiento del proceso (% eliminación de SV y producción de biogás en función de la carga orgánica de alimentación) para ambos digestores.



**Figura 5.36.-** Concentración de ST en la mezcla de alimentación y en el fango digerido en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + residuo industrial.

### 5.2.2.3.-Viabilidad técnico económica.

Recurriendo al cálculo y simulación (ver Tabla A.4.1, A.4.2 del Anexo) se va a considerar la posible viabilidad técnico-económica del proceso de digestión anaerobia de lodos añadiéndole residuo industrial como aditivo al digester anaerobio.

En términos generales, los costes de explotación de una EDAR dependen fundamentalmente del consumo eléctrico y de la gestión de los lodos generados. Por tanto, la producción de lodos y de biogás serán variables importantes a optimizar para conseguir un menor coste de explotación al añadir en los digestores concentraciones controladas de residuo, en este caso procedente de una industria de confitería.

La viabilidad técnica y operacional se analiza a través de los datos derivados del estudio experimental en semicontinuo aquí realizado.

Hay que destacar que el estado físico de este residuo industrial es líquido. No requiere pretratamiento y su almacenamiento será innecesario ya que se ha previsto un suministro continuo, es decir, llegará a la EDAR en camiones cubas que lo suministrarán directamente a los digestores.

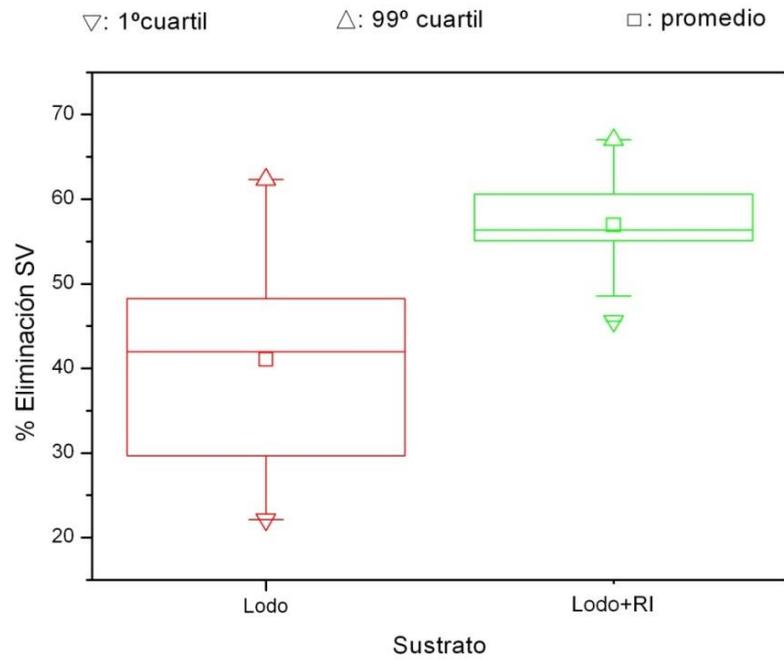
- Caudal másico de lodo mixto: 350 Tm/día.
- Concentración de ST (5,20%) y SV (3,2%) a la entrada del lodo a digester.
- Consumo eléctrico de la EDAR: 36.900 kwh/día.
- Temperatura de digestión: 35°C.
- Residuo Industrial de industria de confitería.
- Potencial de producción de biogás: 0,21 L<sub>biogás</sub>/gS<sub>Valim.</sub> y 0,37 L<sub>biogás</sub>/gS<sub>Valim.</sub>, del lodo mixto y mezcla con residuo, respectivamente (valores medios).
- Coste de gestión de lodos: 20 €/Tm, promedio.

Para determinar con la mayor precisión posible dichos rendimientos de eliminación, se han utilizado los datos experimentales obtenidos en los ensayos de digestión en semicontinuo antes descritos. Dichos datos se han representado en la Figura 5.37 para ambos digestores.

La caja correspondiente al digestor blanco alimentado sólo con lodo mixto muestra que la mediana (línea interior de la caja) no se encuentra en el centro del rectángulo, por lo cual la distribución es asimétrica. Ésta se sitúa próxima al límite superior e indica la existencia de un denso agrupamiento de los datos en el extremo superior, es decir, entre el 42-47% de rendimiento. En el caso de la alimentación con lodo y residuo industrial, la agrupación de datos muestra un comportamiento opuesto al Blanco, siendo la parte inferior la que más datos contiene. Cabe destacar que el rendimiento de eliminación de materia orgánica del proceso se incrementa cuando el digestor es alimentado con residuo industrial.

A la vista de los resultados, se ha considerado que el rendimiento de eliminación de materia orgánica se encuentra en un 45% para el Blanco, y de 46% cuando se adiciona  $1.000 \text{ kg}\cdot\text{día}^{-1}$  por digestor de residuo industrial, de 49% cuando se adiciona  $5.000 \text{ kg}\cdot\text{día}^{-1}$  y 55% cuando se adicionan cantidades superiores a  $10.000 \text{ kg}\cdot\text{día}^{-1}$  de residuo industrial al digestor.

De la Tabla 5.16, que refleja las simulaciones realizadas, se concluye que la adición de este residuo puede bajar considerablemente el coste global de explotación de la EDAR. Los resultados muestran que el tratamiento solo de lodo mixto supondría un coste total de  $1.817 \text{ €/día}$  y que la adición del residuo industrial costaría  $1.607 \text{ €/día}$  cuando la alimentación de residuo fuera  $10.000 \text{ Kg/día}$  y  $1.386 \text{ €/día}$  cuando dicha alimentación alcanzara  $30.000 \text{ Kg/día}$ .



**Figura 5.37.-** Comparación de los componentes utilizados mediante diagrama de caja con el % eliminación de SV como variable.

**Tabla 5.16.-** Tabla de simulación de costes del proceso de digestión de lodos sin aditivo, Reactor Blanco y proceso de digestión de lodos con la incorporación de residuo industrial de panadería como aditivo, Reactor Ensayo. Datos de costes para un caudal másico de alimentación de lodo al proceso.

Definición variable	Símbolo	Unidades	Blanco (Lodo mixto) (Ver Tabla A.4.1)	45% elim S.V.	55% elim S.V.
				Lodo mixto + Residuo Industrial (Ver Tabla A.4.2)	Lodo mixto + Residuo Industrial (Ver Tabla A.4.2)
Caudal de agua residual tratado EDAR	$Q_A$ <sup>1</sup>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	78.500	78.500	78.500
Caudal másico del lodo	$M_1$ <sup>2</sup>	kg·día <sup>-1</sup>	350.000	350.000	350.000
Caudal másico de residuo a añadir	$M_2$ <sup>3</sup>	kg·día <sup>-1</sup>	-	10.000	30.000
Producción diaria de biogás	$V_{gas}$ <sup>4</sup>	Nm <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	2.444	3.309	5.039
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec, bruto}$ <sup>5</sup>	kWh·día <sup>-1</sup>	37.000	37.000	37.000
Energía eléctrica generada en cogeneración	$E_{elec, cog}$ <sup>6</sup>	kWh·día <sup>-1</sup>	5.675	7.683	11.701
Coste gestión lodos	$C_{gest, lodo}$ <sup>7</sup>	€·día <sup>-1</sup>	1.184	1.165	1.326
Coste consumo eléctrico (incluyendo autoconsumo)	$C_{cons, elec}$ <sup>8</sup>	€·día <sup>-1</sup>	633	442	60
<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$ <sup>9</sup>	€·día <sup>-1</sup>	1.817	1.607	1.386

<sup>1</sup>  $Q_A$ : Caudal de agua residual que entra a la EDAR.

<sup>2</sup>  $M_1$ : Caudal de lodos que entra al digestor.

<sup>3</sup>  $M_2$ : Caudal de aditivo.

<sup>4</sup>  $V_{gas}$ : El biogás que se genera al día

<sup>5</sup>  $C_{elec, bruto}$ : Gasto energético en la planta.

<sup>6</sup>  $E_{elec, cog}$  = (Potencia Instalada de planta \* Horas de funcionamiento)/365.

<sup>7</sup>  $C_{gest, lodo}$  = Cantidad lodos \* Precio Gestión.

<sup>8</sup>  $C_{cons, elec}$  = Consumo eléctrico neto EDAR \* Precio energía eléctrica medio. (Considerando que por lo menos, la mitad de la demanda de energía eléctrica es cubierta con la generación, por lo que la electricidad de la red se compra en las horas más baratas).

<sup>9</sup>  $C_{TOTAL} = \sum Costes = C_{gest, lodo} + C_{cons, elec} + C_{transporte} + C_{amortizaci}$



*“La conclusión es que sabemos muy poco y sin embargo, es asombroso lo mucho que conocemos, y más asombroso todavía que un conocimiento tan pequeño pueda dar tanto poder”.* **William Russell.**

## **6.- Conclusiones.**

Como consecuencia del estudio previo realizado y del programa experimental y de cálculo llevado a cabo en este trabajo, se ha llegado, como más relevantes, a las siguientes conclusiones y consideraciones:

1ª.- Que aunque la elección de los aditivos se ha realizado según criterios técnico-económicos, y como no todos los micronutrientes estimulan el crecimiento de las *Methanosarcinas* en la misma extensión, en el estudio bibliográfico se han considerado únicamente tres micronutrientes metálicos con probados efectos positivos (Fe, Ni y Zn) y otros tres de naturaleza orgánica (levaduras, acetato y metanol). No obstante, aunque estos micronutrientes metálicos pueden presentar efectos positivos en la producción de biogás, han sido descartados para la fase experimental como consecuencia de su coste y la presencia de los mismos en los lodos de las EDAR consideradas.

2ª.- Como aditivo se ha optado por las levaduras, puesto que éstas contienen trazas de nutrientes (vitaminas, proteínas, incluidos metales) y pueden ser consideradas como el sustituto económico de los micronutrientes Fe, Ni, y Zn, nombrados. Avala esta elección, como ya se expuso, la bibliografía acerca de estos aditivos.

3ª.- Dado que las bacterias tipo *Methanosarcina* metabolizan acetato y otros compuestos resultantes de la fase de acidogénesis, incrementos en: propionato, acetato e incluso metanol, junto con la disponibilidad de micronutrientes, incrementan la tasa de crecimiento de las bacterias. Con base en lo anterior, se ha utilizado metanol como segundo aditivo experimental, en las medidas de potencial de biometanización realizadas en la primera fase de este estudio utilizando digestores que operaban en discontinuo.

4ª.- En la primera fase de experimentación citada, digestión anaerobia de lodos en proceso discontinuo, los aditivos utilizados en los tres bloques de ensayos han sido, respectivamente, levadura de panadería y metanol, descartado el uso de las trazas de los metales Fe, Ni y Zn debido, como ya se expuso, a las altas concentraciones de los mismos presentes en los lodos de las EDAR, especialmente en los procedentes de la EDAR C.

5ª.- Para comprobar el efecto de la concentración en levadura y si los resultados obtenidos con los lodos de ambas EDAR eran equivalentes, las concentraciones de levadura ensayadas fueron 0,1; 0,5; 1; 2; 3; 6 y 8% (p/v) repartidas entre los tres bloques de ensayos del potencial de biometanización (BMP) usando lodo digerido y lodos mixtos procedentes de la EDAR C, utilizando en el último bloque de ensayos (Bloque 3) concentraciones de 0,5; 1 y 2% (p/v) de levadura con lodo procedente de la EDAR B. Lo más relevante de esta experimentación es que la producción de metano se ve incrementada conforme se aumenta la cantidad de levadura en la alimentación desde el 1 al 3%(p/v). Con la levadura ensayada se alcanzaron 0,508 NL/g<sub>svlev</sub> usando el lodo de B.

6ª.- Las concentraciones de MeOH ensayadas fueron 4, 8, 12, y 20 DQO/L<sub>alim</sub>. Repartidas entre los Bloques de ensayos 1 y 2 y con la utilización de lodo de la EDAR C. En el Bloque de Ensayos 3 se probaron concentraciones de 12 y 16 DQO/L<sub>alim</sub>. con lodo de B. Estos ensayos han determinado que la adición de MeOH también incrementa la producción de metano en los digestores, siendo su potencial de biometanización de 0,328 NL/g<sub>sv MeOH</sub> con el lodo de C y de 0,622 NL/g<sub>sv MeOH</sub> con el lodo de B, lo que parece indicar que el lodo de esta última EDAR está mejor adaptado a este tipo de aditivo.

7ª.- Las curvas de biodegradabilidad, adicionando MeOH, han mostrado la inhibición del proceso durante los primeros cinco días de ensayo, determinando dicho comportamiento cierta inseguridad si se pretende utilizar este aditivo en un proceso continuo de digestión anaerobia, ya que, si las proporciones MeOH/biomasa no son las adecuadas, el proceso puede verse inhibido.

8ª.- La mezcla de levadura y MeOH no mejora el rendimiento del proceso de metanización, respecto a la adición de estos aditivos por separado. Efectivamente, el rendimiento de eliminación de materia orgánica es elevado cuando se adiciona solo levadura, obteniendo rendimientos del 40% de eliminación de sólidos volátiles en el lodo de ambas EDAR. Sin embargo, la adición de metanol produce rendimientos de eliminación dispares en ambas EDAR, obteniendo rendimientos de eliminación del 60% en sólidos volátiles en el lodo de B y valores del 18% de eliminación de sólidos volátiles en el lodo de C.

9ª.- El balance, con los resultados obtenidos en los estudios experimentales a escala laboratorio y la simulación de costes, ha llevado a la conclusión de que en el uso de la levadura como aditivo, su precio de compra podría resultar asequible para su utilización, en el caso que se pudiera gestionar la levadura con cerveceras, ya que ésta, en ellas, pasa a ser residuo y su coste sería menor que el de la comercial, mientras que el del metanol resulta problemático, ya que su precio de mercado hoy es alto, ello sin contar la posible inhibición del proceso que se ha comprobado genera su incorporación.

10ª.- La incorporación de levadura al sistema de digestión anaerobia en semicontinuo, a concentraciones del 2 y 3% p/Valim, supone una mejora significativa en la producción diaria de biogás y eliminación de materia orgánica, obteniendo valores promedio de producción de biogás durante la última semana de operación de 4,88 L<sub>biogás</sub>/día para el digestor ensayo y 1,43 L/día para el digestor blanco. Así mismo, en las mezclas lodo-levadura al 2% y 3% p/Valim., la eliminación promedio de sólidos volátiles fue del 50%, mientras que en el reactor con solo lodo mixto fue de un 39%.

11ª.- El porcentaje de metano fue del 60% en ambos digestores, siendo el contenido en SH<sub>2</sub> inferior a 500 ppm durante la última semana, también en ambos digestores. Así mismo, el digestor ensayo no presentó síntomas de inhibición pese al incremento en la carga de alimentación, con respecto al digestor blanco, ya que las concentraciones de AGV, pH y CE se mantuvieron dentro de los valores adecuados para el buen funcionamiento del sistema. La

concentración de nitrógeno amoniacal del lodo digerido en ambos reactores fue inferior a 1,2 g  $N-NH_4^+$ /L, valores que son normales, y sin consecuencias inhibitorias para el sistema, manteniéndose el valor del pH en dichos digestores dentro del rango de operación habitual de un proceso de digestión anaerobia (pH entre 6-8).

12ª.- La concentración de sólidos totales en el reactor ensayo no presentó valores superiores a los obtenidos en el reactor blanco. Esto es consecuencia de que el incremento provocado en la carga de alimentación del reactor ensayo, con respecto al blanco, provocó a su vez un incremento en los rendimientos de eliminación de materia volátil. Adicionalmente, la baja concentración de sólidos fijos de la levadura llevó consigo que la concentración de sólidos totales en ambos digestores fuese similar durante la experimentación.

13ª.- Las simulaciones realizadas con los resultados obtenidos en el estudio experimental en los digestores piloto muestran que la adición de levadura reduce los costes asociados al proceso de digestión, ya que disminuye significativamente el gasto en consumo de electricidad y aumenta el calor residual de la cogeneración, aprovechable, así, para el calentamiento del digestor.

Los costes del proceso, en función del posible precio de adquisición de la levadura, determinan que si se usa el 2% p/ $V_{alim}$  debe encontrarse por debajo de 150 €/Tm y en el caso del 3%, el coste sería más bajo, 122 €/Tm. Por encima de este valor es más rentable usar la levadura al 2%.

14ª.- Respecto a los ensayos en discontinuo con residuos, los tres residuos ensayados en el bloque 4: matadero, lixiviados y deyecciones ganaderas presentan distintos niveles de producción de metano. La mayor generación corresponde a los de matadero y la menor a los lixiviados, ocupando una posición relevante la mezcla de todos ellos, lo cual puede ser constatado por los niveles del BMP medidos, así como los volúmenes de  $CH_4$  acumulados para cada uno de los tipos de ensayo.

15ª.- Igualmente, los tres residuos ensayados en el bloque 5: matadero, deyecciones ganaderas y vegetales, también presentan distintos niveles de producción de metano. Encabeza la misma, también, los residuos de matadero, le siguen los vegetales y la más baja producción corresponde a las deyecciones ganaderas. Igual que en el caso anterior, la mezcla de todos ellos ocupa el segundo lugar. Estos datos también quedan verificados atendiendo a los valores de  $V_{CH_4}$  acumulado y del potencial de biometanización.

16ª.- En el bloque 6 de ensayos en discontinuo, el residuo industrial supera en producción de metano, al vegetal y a los lixiviados, ofreciendo la mezcla de todos ellos unos valores en el entorno de los que ofrece el residuo industrial. Igualmente, estos resultados quedan refrendados por los valores medidos de  $V_{CH_4}$  acumulado y del BMP de todos ellos.

17ª.- Si atendemos a los costes de la unidad de tratamiento ( $\text{€/m}^3$  de agua tratada), con cada uno de los residuos utilizados: deyecciones ganaderas, residuo de matadero, lixiviado y residuo industrial; los valores máximos de compraventa de estos productos dan valores negativos tanto para las deyecciones, como los lixiviados, que indican que las operaciones en ellos no son rentables, salvo que la EDAR, por el tratamiento de los mismos, cobrase sus costes de gestión y transporte, los cuales para las deyecciones ganaderas supondrían unos 2000 €/día y para los lixiviados 700 €/día, aproximadamente.

18ª.- En los ensayos en semicontinuo con residuos, el aumento de carga del residuo industrial en el digestor ensayo lleva consigo el aumento en la producción diaria de biogás y, por tanto, su volumen final acumulado al cabo de 38 días de fermentación ha sido de 212 litros, frente a los 73 litros en el digestor blanco, alimentado únicamente con lodo mixto. En ambos reactores la composición en metano se mantiene igual y constante, en el entorno del 50%, la cual es de un nivel adecuado para su posterior uso, y no difieren en exceso de los valores de referencia del biogás generado en las EDAR.

19ª.- Todos los parámetros de control se encuentran dentro de los rangos y niveles determinados por la experiencia, para el adecuado funcionamiento de los

digestores generadores de metano, en este caso alimentados: uno, sólo por lodo mixto, el blanco y el del ensayo, al que se ha alimentado también con un residuo industrial líquido, en este caso de confitería.

20ª.- De los datos experimentales obtenidos en los ensayos de digestión en semicontinuo, antes descritos, se ha podido constatar que la adición de este residuo de confitería a la fermentación de lodos mixtos de la EDAR mejora considerablemente el coste global de explotación de la misma, como se deduce de las simulaciones realizadas. Para un 55% de eliminación de SV se obtiene más del 23% de ahorro en la explotación.

21ª.- Finalmente concluiremos, que este estudio ha apuntado con suficiente precisión a que es posible mejorar los procesos de fermentación anaerobia de lodos de depuradoras tanto para su inertización, objetivo primario, como para la producción de biogás dopándolo con algunos fermentos o aditivos químicos, así como con residuos de diversas procedencias posibilitando simultáneamente su eliminación.

*“El que lee mucho y anda mucho,  
ve mucho y sabe mucho”.*  
**Miguel de Cervantes.**

## **7.- Referencias.**

- 1.- Eddy, M., Ingeniería de Aguas Residuales. Tercera Edición, Vol. 1. Mc Graw Hill. Madrid. 1995.
- 2.- Fuertes, Á.L., Estudio de la co-digestión anaerobia de residuos ganaderos con otros substratos agroindustriales, Instituto de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Biodiversidad, área de ingeniería química, Universidad de León: León, 2012.
- 3.- Campero Rivero, O., Monitorización y Evaluación comparativa de la tecnología de biodigestión anaerobia como fuente de energía renovable en dos ámbitos familiar e industrial en Bolivia, Universidad Internacional de Andalucía: Universidad de Huelva: Huelva. p. 1-249. 2012.
- 4.- Thauer, R.K., Biochemistry of methanogenesis: a tribute to Marjory Stephenson. Microbiology, 144: p. 2377-2406. 1998.
- 5.- Rivera, R., et al., Algunos aspectos acerca del proceso de digestión anaerobia, parte 1. Revista Latino Americana Microbiología, 35: p. 451-458. 1993.
- 6.- Karakashev, D., Batstone, D.J., Angelidaki, I., Influence of environmental conditions on methanogenic compositions in anaerobic biogas reactors. Applied and Environmental Microbiology, 71. 2005.
- 7.- Schnürer, A., Jarvis, A., Microbiological Handbook for Biogas Plants. Swedish Waste Management U2009:03. Swedish Gas Centre Report 207. 2010.
- 8.- Gerardi, M.H., The microbiology of anaerobic digesters. Wiley-Interscience. 2003.
- 9.- Demirel, B., Scherer, P., Trace element requirements of agricultural biogas digesters during biological conversion of renewable biomass to methane. Biomass and Bioenergy, 35(3): p. 992-998. 2011.
- 10.- Potenciadores de los procesos biológicos. AMG. Documento 10. Depuración: Digestión anaerobia. 2010; Disponible en:  
[http://www.aguasresiduales.info/main/index.php?md\\_0=10&md\\_1=7&id=2&page=1&navi=Netscape](http://www.aguasresiduales.info/main/index.php?md_0=10&md_1=7&id=2&page=1&navi=Netscape).

- 11.- Climenhaga, M.A., Banks, C. J., Anaerobic digestion of catering wastes: effect of micronutrients and retention time. *Water Science & Technology*, 57(5): p. 687-692. 2008.
- 12.- Noyala, A., Tinajero, A., Effect of biological additives and micronutrients on the anaerobic digestion of physicochemical sludge. *Water Science & Technology*, 52(1-2): p. 275-281. 2005.
- 13.- Zitomer, D.H., Johnson, C.C., Speece, R.E., Metal stimulation and municipal digester thermophilic/mesophilic activity. *Journal of Environmental Engineering*, 134(1): p. 42-47. 2008.
- 14.- Hu, Q. H., et al., Enhancement of methane fermentation in the presence of Ni<sup>2+</sup> chelators. *Biochemical Engineering Journal*, 38(1): p. 98-104. 2008.
- 15.- Speece, R.E., Parkin, G.F., Gallagher, D., Nickel stimulation of anaerobic digestion. *Water Research*, 17(6): p. 677-683. 1983.
- 16.- Ashley, N.V., Davies, M., Hurst, T.J., The effect of increased nickel ion concentrations on microbial populations in the anaerobic digestion of sewage sludge. *Water Research*, 16(6): p. 963-971. 1982.
- 17.- Dar, G.H., Tandon, S.M., Response of a cattle dung methane fermentation to nickel. *Biological Wastes*, 22: p. 261-268. 1987
- 18.- Murray, W.D., Van Den Berg, L., Effects of Nickel, Cobalt, and Molybdenum on performance of methanogenic fixed-film reactors. *Applied Environmental Microbiology*, 42(3): p. 502-505. 1981.
- 19.- Diekert, G., Konheiser, K.P., Thauer, R.K., Nickel requirement and factor F430 content of methanogenic bacteria. *Journal of Bacteriology*, 148(2): p. 459-464. 1981.
- 20.- Takashima, M., Speece, R.E. Parkin, G.F., Mineral requirements for methane fermentation. *Critical Reviews in Environmental Control*, 19(5): p. 465-479. 1990.
- 21.- Schattauer, A., et al., Abundance of trace elements in demonstration biogas plants. *Biosystems Engineering*, 108(1): p. 57-65. 2011.
- 22.- Banks, C., Bolzonella, D., Zhang, Y., Jiang, Y., Cavinato, C. VALORGAS, Description of problems associated with ammonia toxicity and trace metal deficiency in mesophilic and thermophilic digestion of high nitrogen wastes. Seventh Framework Programme Theme Energy.3.2. 2010.

- 23.- Escalante, V.E., Moeller, G.E., Martínez, C. A., Hipólito, F.C. Efecto de un estimulante en la degradación anaerobia de lodos residuales. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/mexicon/R-0051.pdf>.
- 24.- Oosterkamp, W.J., Enhancement of biogas production from straw and manure. An annotated bibliography. Draft submitted to Waste and Biomass Valorisation, 2011.
- 25.- Torres, P. L., Rodríguez, J. V., Andrés C. A., Pérez, A. V., La actividad metanogénica como herramienta para optimización del proceso anaerobio en el tratamiento de aguas residuales fácilmente acidificables. Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún (México), 27-31 de Octubre, 2002.
- 26.- Mah, R.A., Smith, M. R., Baresi, L., Studies on an Acetate-Fermenting strain of *Methanosarcina*. Applied and Environmental Microbiology. 35(6): p. 1174-1184. 1978.
- 27.- Zandvoort, M.H., et al., Granular sludge in full-scale anaerobic bioreactors: Trace element content and deficiencies. Enzyme and Microbial Technology, 39(2): p. 337-346. 2006.
- 28.- Murray, P.A., Zinder, S. H., Nutritional requirements of *Methanosarcina* sp. Strain TM-1. Applied and Environmental Microbiology, 50(1): p. 49-55. 1985.
- 29.- Moeller, G., Ferat, C., Escalante Estrada, V., Utilización de un bioestimulante para incrementar la eficiencia de un digestor anaerobio de lodos. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/268330418>. 2015.
- 30.- Zhang, Y., et al., Uptake and mass balance of trace metals for methane producing bacteria. Biomass and Bioenergy, 25(4): p. 427-433. 2003.
- 31.- Pobeheim, H., et al., Impact of nickel and cobalt on biogas production and process stability during semi-continuous anaerobic fermentation of a model substrate for maize silage. Water Research, 45(2): p. 781-787. 2011.
- 32.- Lezcano, E., Cadena de la Levadura. Alimentos Argentinos. MinAgri. Disponible en: [www.alimentosargentinos.gov.ar](http://www.alimentosargentinos.gov.ar). 2012.
- 33.- Methanol Institute, Ed. Aspectos básicos del metanol. Disponible en: <http://www.methanol.org/>. 2011.

- 34.- Zinder, S.H., Elias, A.F., Growth Substrate Effects on Acetate and Methanol Catabolism in *Methanosarcina* sp Strain TM-1. *Journal of Bacteriology*, 163: p. 317-323. 1985.
- 35.- Repsol. Disponible en: [www.repsol.es](http://www.repsol.es), 2014.
- 36.- AINIA. Valorización energética: producción de biogás mediante codigestión anaerobia de residuos/subproductos orgánicos agroindustriales. Disponible en: [http://www.coitavc.org/cms/site\\_0001/comunicados/AINIA](http://www.coitavc.org/cms/site_0001/comunicados/AINIA).
- 37.- García, J., Castillo, J., Ferrer, C., Moliner, F., Donato, J., Albarrán, F., Tratamiento de lixiviados de vertedero de RSU mediante proceso combinado de ultrafiltración y ósmosis inversa. *Retema: Revista técnica de medio ambiente*: P. 20-29. 2009.
- 38.- Tyagi, V.K., Lon, S. L. Sludge: A waste or renewable source for Energy and resources recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 25. P.708-723. 2014.
- 39.- Biogás, A.E.D. AEBIG. 2014. Disponible en: [http://www.aebig.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=45&Itemid=2](http://www.aebig.org/index.php?option=com_content&view=article&id=45&Itemid=2).
- 40.- Montes Carmona, M.E., Estudio técnico económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás., Ed. Departamento de Ingeniería Civil: Ordenación del Territorio, Urbanismo y Medio Ambiente. E.T.S. I. de Caminos, Canales y Puertos. 2008.
41. Stock, T., Rother, M., Selenoproteins in Archaea and Gram-positive bacteria. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) (General Subjects)*, 1790(11): p. 1520-1532. 2009.
- 42.- Potenciadores de los procesos biológicos. AMG. Documento 8. Depuración: Digestión anaerobia. 2010. Disponible en [http://www.aguasresiduales.info/main/index.php?md\\_0=10&md\\_1=7&id=2&page=1&navi=Netscape](http://www.aguasresiduales.info/main/index.php?md_0=10&md_1=7&id=2&page=1&navi=Netscape).
- 43.- Anaerobic wastewater treatment & sludge digestion. MICROCAT-AD. Nutrient Blend for anaerobic digesters. 2011. Disponible en: <http://www.qmes.nl/applications/wastewater-treatment/anaerobic-sludge-digestion/>.
- 44.- AQUAFIX. Anaerobic micronutrients. 2011. Disponible en: <file:///Z:/Ambiente/Proyectos/2011/Proy%20Regionales/Aquagest/Methanosarcinas/Nutrientes%20industriales/vitastimanerobic.aspx.htm>.

45.- BioChem, N100 (Micronutriente BIO-Energético Bacterial). 2011. Disponible en:

[http://www.biochem.com.mx/productos/p34-N100\\_Micronutriente\\_BIO-Energ%C3%A9tico\\_bacterial\\_/](http://www.biochem.com.mx/productos/p34-N100_Micronutriente_BIO-Energ%C3%A9tico_bacterial_/).

46.- Gottau, G., Levadura de cerveza: multivitamínico natural. 2008. Disponible en: <http://www.vitonica.com/vitaminas/levadura-de-cerveza-multivitaminico-natural>.

47.- Poballe. Levadura de cerveza húmeda. 2011. Disponible en: [http://www.poballe.com/producte.asp?ids=151108410201731807121es&p\\_fam=&p\\_prod=levadura-de-cerveza-humeda](http://www.poballe.com/producte.asp?ids=151108410201731807121es&p_fam=&p_prod=levadura-de-cerveza-humeda).



## 8.- Índice de figuras.

<b>Figura 3.1.-</b> Etapas de la digestión anaerobia con flujo de energía. <i>Adaptación de [1].....</i>	12
<b>Figura 3.2.-</b> Esquema del metabolismo de las células. Adaptado de [7].....	15
<b>Figura 3.3.-</b> Pirámide de gestión de residuos. Adaptación de [35].....	28
<b>Figura 4.1.-</b> Equipo AMPTS (Bioprocess Control) para la medida del potencial de biometanización en discontinuo.....	33
<b>Figura 4.2.-</b> Equipo Termogravimétrico para la medida de humedad, sólidos volátiles, carbono fijo y cenizas.....	34
<b>Figura 4.3.-</b> Equipo de co-digestión anaerobia en semicontinuo.....	36
<b>Figura 4.4.-</b> Analizador de Biogás.....	36
<b>Figura 4.5.-</b> Fases de alimentación de la carga orgánica a lo largo del ensayo para ambos reactores.....	53
<b>Figura 4.6.-</b> Fases del suministro de la carga orgánica de alimentación para el reactor ensayo.....	67
<b>Figura 5.1.-</b> Bloque de Ensayos 1. Volumen de CH <sub>4</sub> acumulado en función del tiempo. 15 reactores.....	76
<b>Figura 5.2.-</b> Bloque de Ensayos 2. Volumen de CH <sub>4</sub> acumulado en función del tiempo. 15 reactores.....	80

<b>Figura 5.3.-</b> Bloque de Ensayos 3. Volumen de CH <sub>4</sub> acumulado en función del tiempo. 15 reactores.....	84
<b>Figura 5.4.-</b> Producción diaria volumétrica de biogás de los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + levadura.....	93
<b>Figura 5.5.-</b> Volumen de biogás acumulado y % en riqueza de CH <sub>4</sub> en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2% y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.....	94
<b>Figura 5.6.-</b> Volumen de biogás producido cada día por g de SV alimentado en los digestores operados con fango mixto y fango mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2% y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.....	95
<b>Figura 5.7.-</b> Volumen de biogás producido cada día por g de SV eliminado en los digestores operados con fango mixto y fango mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2% y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.....	96
<b>Figura 5.8.-</b> Composición del biogás (CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , SH <sub>2</sub> y otros) en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2% y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.....	97
<b>Figura 5.9.-</b> Valores de alcalinidad total en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2% y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.....	99

**Figura 5.10.-** Concentración de AGV en los digestores alimentados con fango mixto y lodo mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2% y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.....100

**Figura 5.11.-** Relación  $AGV/ALK_T$  en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2% y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.....101

**Figura 5.12.-** Concentración de nitrógeno total y nitrógeno amoniacal en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2% y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.....102

**Figura 5.13.-** Relación C/N en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2% y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.....104

**Figura 5.14.-** pH y conductividad eléctrica en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2% y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3% .....105

**Figura 5.15.-** Rendimiento de eliminación de sólidos volátiles (SV) en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + levadura. Ajuste polinómico (grado 5) de los datos obtenidos a lo largo del ensayo.....107

**Figura 5.16.-** Concentración de SV en alimentación y fango digerido para los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2% y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.....108

<b>Figura 5.17.-</b> Rendimiento del proceso (% eliminación de SV y producción de biogás en función de la carga orgánica de alimentación) para ambos digestores. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2% y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.....	110
<b>Figura 5.18.-</b> Concentración de ST en la mezcla de alimentación y en fango digerido en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + levadura. Entre los días 5 y 20, alimentado con levadura al 2% y a partir del 21 hasta el final del ensayo, con levadura al 3%.....	111
<b>Figura 5.19.-</b> Costes del proceso de digestión anaerobia según la concentración de levadura alimentada (2 y 3 % p/v <sub>alim.</sub> ), en función de su precio de adquisición. ....	114
<b>Figura 5.20.-</b> Bloque de Ensayos 4. Volumen de CH <sub>4</sub> acumulado en función del tiempo.....	117
<b>Figura 5.21.-</b> Bloque de Ensayos 5. Volumen de CH <sub>4</sub> acumulado en función del tiempo.....	121
<b>Figura 5.22.-</b> Bloque de Ensayos 6. Volumen de CH <sub>4</sub> acumulado en función del tiempo.....	124
<b>Figura 5.23.-</b> Producción diaria volumétrica de biogás de los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + residuo industrial .....	134
<b>Figura 5.24.-</b> Volumen de biogás acumulado y % en riqueza de CH <sub>4</sub> en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + residuo industrial.....	135

<b>Figura 5.25.-</b> Volumen de biogás producido por g SV alimentado en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + residuo industrial.....	136
<b>Figura 5.26.-</b> Volumen de biogás producido por g SV eliminado en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + residuo industrial.....	137
<b>Figura 5.27.-</b> Composición del biogás (CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , SH <sub>2</sub> y otros) en los digestores alimentados con fango mixto (arriba) y fango mixto + residuo industrial (abajo).....	138
<b>Figura 5.28.-</b> Valores de alcalinidad total en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + residuo industrial.....	140
<b>Figura 5.29.-</b> Concentración de AGV en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + residuo industrial.....	141
<b>Figura 5.30.-</b> Relación AGV/ALK <sub>T</sub> en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + residuo industrial.....	142
<b>Figura 5.31.-</b> Concentración de nitrógeno total y nitrógeno amoniacal en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + residuo industrial....	144
<b>Figura 5.32.-</b> Relación pH y conductividad eléctrica en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + residuo industrial.....	145
<b>Figura 5.33.-</b> Rendimiento de eliminación de sólidos volátiles (SV) en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + residuo industrial. Ajuste polinómico (grado 4) de los datos obtenidos a lo largo del ensayo.....	146

<b>Figura 5.34.-</b> Concentración de SV en alimentación y fango digerido para los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + residuo industrial.....	148
<b>Figura 5.35.-</b> Rendimiento del proceso (% eliminación de SV y producción de biogás en función de la carga orgánica de alimentación) para ambos digestores.....	150
<b>Figura 5.36.-</b> Concentración de ST en la mezcla de alimentación y en el fango digerido en los digestores alimentados con fango mixto y fango mixto + residuo industrial.....	151
<b>Figura 5.37.-</b> Comparación de los componentes utilizados mediante diagrama de caja con el % eliminación de SV como variable.....	154
<b>Figura A.1.-</b> Diagrama de flujo de un sistema <i>tipo</i> de digestión anaerobia....	187

## 9.- Índice de tablas.

<b>Tabla 1.1.-</b> Resumen del RD 900/2015.....	2
<b>Tabla 3.1.-</b> Especies de bacterias metanogénicas y sus componentes [8].....	16
<b>Tabla 3.2.-</b> Requisitos nutricionales de los digestores anaerobios [8].....	18
<b>Tabla 3.3.-</b> Resumen de estudios realizados en digestores anaerobios. Investigación de la presencia y/o adición de aditivos.....	22
<b>Tabla 3.4.-</b> Magnitudes comunes y habituales de un lodo mixto.....	31
<b>Tabla 3.5.-</b> Sustancias comunes y habituales en los lodos digeridos. Adaptación de [1].....	31
<b>Tabla 3.6.-</b> Componentes del biogás según el aditivo utilizado. Adaptación de [40].....	32
<b>Tabla 4.1.-</b> Principales activadores de las metaloenzimas identificadas en la ruta metanogénica acetoclástica [22].....	38
<b>Tabla 4.2.-</b> Concentraciones de micronutrientes contenidas en NEUSOL M&B [42].....	39
<b>Tabla 4.3.-</b> Características químico-nutritivas de la levadura de cerveza húmeda [47].....	40

<b>Tabla 4.4.-</b> Programación de experimentos de los Bloques de Ensayos 1, 2 y 3 .....	43
<b>Tabla 4.5.-</b> Características de los distintos componentes utilizados en las pruebas de medida del potencial de biometanización en discontinuo con: levadura y metanol.....	45
<b>Tabla 4.6.-</b> Caracterización inicial de los lodos de la EDAR C y la levadura utilizados en la alimentación de los digestores.....	49
<b>Tabla 4.7.-</b> Fases del ensayo en los digestores. Cantidad de componentes alimentados en cada una de las fases del ensayo.....	52
<b>Tabla 4.8.-</b> Determinaciones analíticas para el control y seguimiento del proceso de digestión en las muestras de alimentación, lodo digerido y biogás generado.....	54
<b>Tabla 4.9.-</b> Programación de experimentos de los bloques de Ensayos 4, 5 y 6.....	58
<b>Tabla 4.10.-</b> Caracterización de los lodos y residuos utilizados en los bloques de Ensayos 4, 5 y 6 de las EDAR A, B y C.....	60
<b>Tabla 4.11.-</b> Caracterizaciones iniciales de los lodos y el aditivo (residuo industrial) utilizados en la alimentación de los digestores.....	63
<b>Tabla 4.12.-</b> Fases del ensayo en los digestores. Cantidad de aditivo y lodo alimentado en cada una de las fases del ensayo.....	66
<b>Tabla 4.13.-</b> Determinaciones analíticas para el control y seguimiento del proceso de digestión en las muestras de alimentación, digestato y análisis del biogás generado.....	69

<b>Tabla 5.1.-</b> Resultados del Bloque de Ensayos 1. Rendimiento de eliminación de SV, BMP en discontinuo y producción específica de metano.....	75
<b>Tabla 5.2.-</b> Resultados del Bloque de Ensayos 2. Rendimiento de eliminación de SV, BMP en discontinuo y producción específica de metano.....	79
<b>Tabla 5.3.-</b> Resultados del Bloque de Ensayos 3. Rendimiento de eliminación de SV, BMP en discontinuo y producción específica de metano.....	83
<b>Tabla 5.4.-</b> Tabla de costes/beneficios de la operación en la EDAR C, utilizando los aditivos y concentraciones antes seleccionados.....	88
<b>Tabla 5.5.-</b> Tabla de costes/beneficios de la operación en la EDAR B, utilizando los aditivos y concentraciones antes seleccionados.....	89
<b>Tabla 5.6.-</b> Datos promedio de producción de biogás obtenidos en los digestores alimentados con lodo mixto y lodo mixto + levadura, por semanas.....	92
<b>Tabla 5.7.-</b> Simulaciones del proceso de digestión anaerobia cuando se añaden distintas concentraciones de levadura como aditivo.....	115
<b>Tabla 5.8.-</b> Resultados obtenidos: Volumen de metano acumulado y potencial de biometanización en discontinuo (BMP) en cada una de las mezclas del bloque 4 de ensayos en la EDAR A.....	118
<b>Tabla 5.9.-</b> Resultados obtenidos: Volumen de metano acumulado y potencial de biometanización en discontinuo (BMP) en cada una de las mezclas del bloque 5 de ensayos en la EDAR C.....	122

<b>Tabla 5.10.-</b> Resultados obtenidos: Volumen de metano acumulado y potencial de biometanización en discontinuo (BMP) en cada una de las mezclas del bloque 6 de ensayos en la EDAR B.....	125
<b>Tabla 5.11.-</b> Tabla de costes/beneficios de la operación en la EDAR A, utilizando los residuos y concentraciones antes seleccionados.....	128
<b>Tabla 5.12.-</b> Tabla de costes/beneficios de la operación en la EDAR C, utilizando los residuos y concentraciones antes seleccionados.....	129
<b>Tabla 5.13.-</b> Tabla de costes/beneficios de la operación en la EDAR B, utilizando los residuos y concentraciones antes seleccionados.....	130
<b>Tabla 5.14.-</b> Datos promedio de producción de biogás obtenidos en los digestores alimentados con lodo mixto y lodo mixto + residuo industrial, cada semana de trabajo.....	133
<b>Tabla 5.16.-</b> Tabla de simulación de costes del proceso de digestión de lodos sin aditivo, Reactor Blanco y proceso de digestión de lodos con la incorporación de residuo industrial de panadería como aditivo, Reactor Ensayo. Datos de costes para un caudal másico de alimentación de lodo al proceso.....	155
<b>Tabla A.1.1.-</b> Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con lodo mixto, del 1 <sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 1.....	191
<b>Tabla A.1.2.-</b> Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 3%, del 1 <sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 2.....	195
<b>Tabla A.1.3.-</b> Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con MeOH 12gDQO/L, del 1 <sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 7.....	199

<b>Tabla A.1.4.-</b> Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 1%, del 2º bloque de ensayos – Comb. 2.....	203
<b>Tabla A.1.5.-</b> Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 2%, del 2º bloque de ensayos – Comb. 3.....	207
<b>Tabla A.1.6.-</b> Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con MeOH 16gDQO/L, del 2ª bloque de ensayos – Comb. 4.....	211
<b>Tabla A.1.7.-</b> Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B, con lodo mixto, del 3er bloque de ensayos – Comb. 2.....	215
<b>Tabla A.1.8.-</b> Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con levadura al 1%, del 3er bloque de ensayos – Comb. 3.....	219
<b>Tabla A.1.9.-</b> Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con levadura al 2%, del 3er bloque de ensayos – Comb. 4.....	223
<b>Tabla A.1.10.-</b> Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con MeOH 16gDQO/L, del 3er bloque de ensayos – Comb. 6.....	227
<b>Tabla A.1.11.-</b> Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con MeOH 12gDQO/L, del 3er bloque de ensayos – Comb. 7.....	231
<b>Tabla A.2.1.-</b> Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR A, con lodo mixto, del 4º bloque de ensayos.....	237
<b>Tabla A.2.2.-</b> Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR A con residuo de matadero (L <sub>dig</sub> :Aditivo - 2:0,5), del 4º bloque de ensayos – Comb. 2.....	241

<b>Tabla A.2.3.-</b> Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR A con lixiviado ( $L_{\text{dig}}:\text{Aditivo} - 2:0,1$ ), del 4º bloque de ensayos – Comb. 3.....	245
<b>Tabla A.2.4.-</b> Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR A con deyecciones ganaderas ( $L_{\text{dig}}:\text{Aditivo} - 2:0,5$ ), del 4º bloque de ensayos – Comb. 4.....	249
<b>Tabla A.2.5.-</b> Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con lodo mixto, del 5º bloque de ensayos.....	253
<b>Tabla A.2.6.-</b> Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con residuo de matadero ( $L_{\text{dig}}/\text{Aditivo} - 2:0,5$ ), del 5º bloque de ensayos – Comb. 2 .....	257
<b>Tabla A.2.7.-</b> Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con deyecciones ganaderas ( $L_{\text{dig}}/\text{Aditivo} - 2:0,5$ ) del 5º bloque de ensayos – Comb. 3.....	261
<b>Tabla A.2.8.-</b> Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con lodo mixto, del 6º bloque de ensayos.....	265
<b>Tabla A.2.9.-</b> Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con residuo industrial ( $L_{\text{dig}}/\text{Aditivo} - 2:0,5$ ), del 6ª bloque de ensayos – Comb. 2.....	268
<b>Tabla A.3.1.-</b> Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con lodo mixto.....	275
<b>Tabla A.3.2.-</b> Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 2% p/v .....	279

**Tabla A.3.3.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 3% p/v.....283

**Tabla A.4.1.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con lodo mixto.....289

**Tabla A.4.2.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia con residuo industrial en la EDAR B.....293



*Muchos de los fracasos vitales son de gente que no se dieron cuenta lo cerca que estaban del éxito cuando se rindieron. Edison*

## **10.- Anexos.**

Tomando como base muy simplificada el Diagrama de Flujo (Figura A.1) en el que se refleja la estructura del conjunto del digestor anaerobio de lodos de una cualquiera de las EDAR de las que se ha utilizado en esta investigación, junto al sistema de cogeneración que, como combustible, utiliza el biogás generado en el reactor anaerobio (digestor anaerobio) y del que parte de la energía atiende a la calefacción del mismo, se van a describir las tablas que se adjuntan como Anexos y que son el compendio de magnitudes representativas de estos procesos, así como los resultados obtenidos en los cálculos de un programa standard en Excel diseñado para simular y calcular la operativa de las EDAR, así como los procesos de cogeneración anejos.

Cada bloque de estos Anexos se corresponde con los cálculos realizados y magnitudes utilizadas con cada uno de los aditivos y/o residuos empleados en esta investigación en sus distintas concentraciones (metanol, levadura, residuos, etc.) menos las tablas A.1.1; A.1.7; A.2.1; A.2.5; A.2.8; A.3.1; A.4.1 que se corresponden con el proceso de fermentación anaeróbica del lodo, sin aditivo alguno, simplemente con la alimentación de lodo digerido y mixto al digestor anaerobio.

Tomando como referencia la Tabla A.1.2," Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 3% del Bloque 1 de ensayos – Combinación 2", las de los otros aditivos y/o residuos son semejantes, procedemos a su descripción y comentario:

En la primera parte de la Tabla que corresponde a la alimentación al digestor (izquierda y derecha) encontramos:

Magnitudes que hacen referencia a componentes 1, 2 y 3. Las correspondientes al componente 1 son relativos a los lodos, al 2 relativos a los aditivos y el 3 no existe en esta parte de la investigación. Entre estas magnitudes se encuentran:

caudales másicos  $M_i$ , concentraciones de sólidos totales  $[ST]_i$  y volátiles  $[SV]_i$ , cargas orgánicas de cada uno ( $OLR_i$ ) y totales ( $OLR_D$ ), entre otros. En la parte inferior, (Izquierda y Derecha), bajo el epígrafe de Proceso de Digestión tenemos:

Potencial de Biometanización ( $BMP_i$ ) que luego se aplica en los cálculos de las EDAR para obtener la producción de biogás y, por tanto, de metano, como ya vimos, así como la producción de dicho biogás ( $V_{gas}$ ) y su concentración en  $CH_4$ . También las magnitudes que definen el lodo que sale del digester que finalmente ha de ser gestionado para su retiro a vertedero, caudal de lodo ( $Q_{SD}$ ), concentración de sólidos totales ( $[ST]_{SD}$ ), y alguna otra de utilidad como sólidos volátiles eliminados en digestión ( $SV_{elim}$ ).

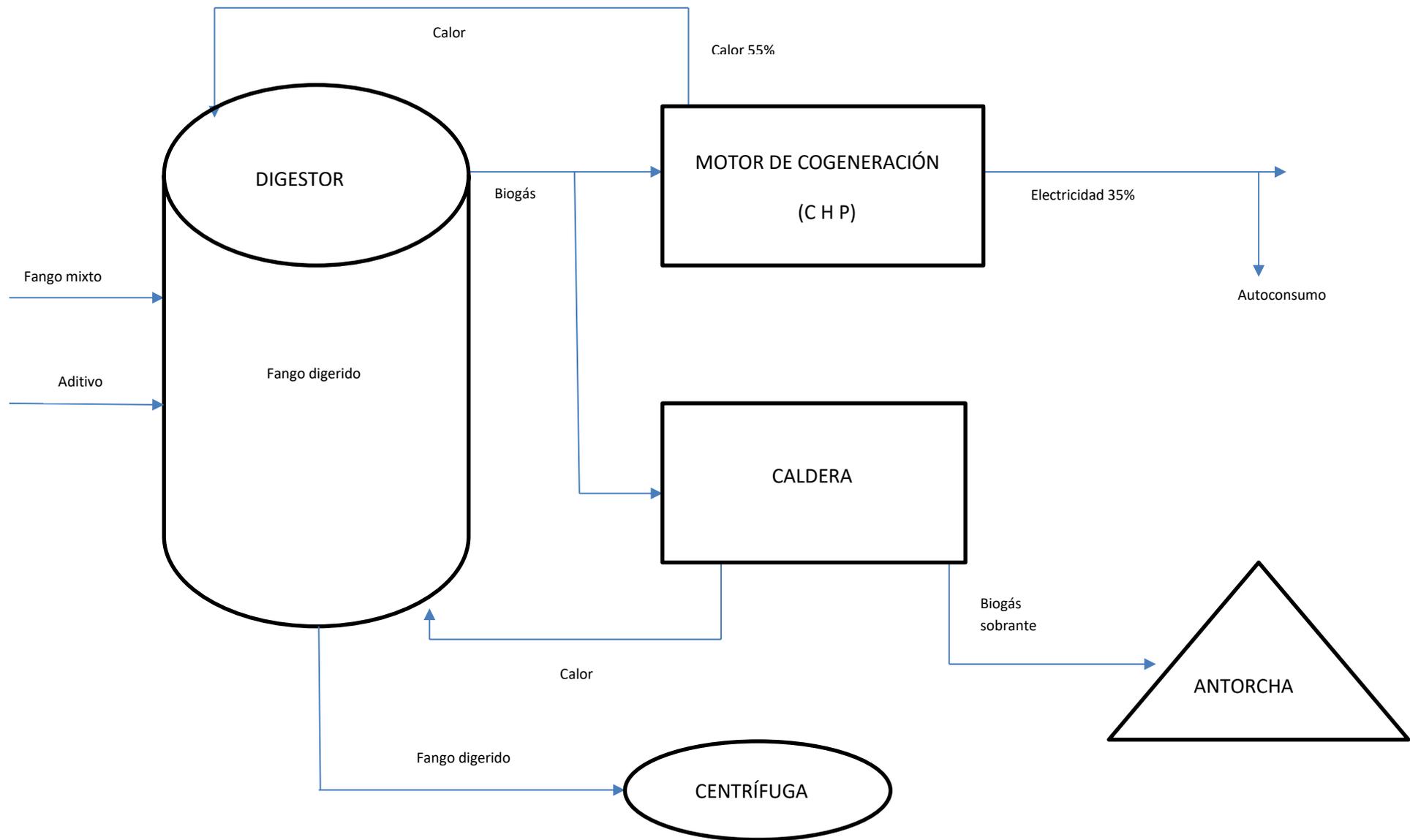
En los apartados de Sistemas de Calefacción del Digester (caldera) (izquierda y derecha) se recopilan todas las temperaturas del sistema, y parámetros de la caldera: Coeficiente de Transferencia de Calor ( $U_T$ ), rendimiento ( $\eta_{INT}$ ), etc., así como las características del combustible y sus caudales necesarios y excedentes ( $Q_{gas}$ ), junto con las magnitudes: caudal de agua utilizada como fluido en el intercambiador ( $Q_w$ ), y capacidad de calderas ( $Q_{cal}$ , Kcal/h), entre otras.

Como interviene en el balance económico a plantear, ya que es ahí donde procesamos el biogás producido para obtener la energía, en este apartado también se exponen las magnitudes correspondientes al sistema de cogeneración que opera, en cada caso, en estas EDAR. Así tenemos: Rendimientos, eléctrico ( $\eta_{elec}$ ) y térmico ( $\eta_{term}$ ), pérdidas, energías generada contenida en el biogás ( $E_{elec.cog}$  en Kw/año), Potencia total generada ( $Pot_{cog}$  en kW), fundamentalmente.

Finalmente, en el fondo de la Tabla A.1.2 (tercera parte) (Izquierda y Derecha) se recopilan los Datos Económicos del Sistema, que se utiliza como datos económicos en esta Tesis y que están recogidos en las Tablas correspondientes expuestas en la misma que, incluyendo los distintos costes que nos han servido para estimar en cada situación de las planteadas en esta investigación los precios a pagar por cada uno de los aditivos que ya se expusieron, así como los

distintos costes que en los procesos a desarrollar, que también determinan la rentabilidad de cada uno de los supuestos planteados. Así tenemos: consumos eléctricos y sus precios, coste de transporte de residuos, magnitudes de la inversión, coste de gestión de lodos, el precio de compra del residuo ( $C_{\text{residuo}}$ ) y % de autoconsumo, entre otros.





**Figura A.1.-** Diagrama de flujo de un sistema *tipo* de digestión anaerobia.



ANEXO 1: Simulaciones del proceso de digestión anaerobia en discontinuo con el uso de levadura y metanol como aditivos.



**Tabla A.1.1.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con lodo mixto, del 1<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 1 (Primera parte).**

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	Q <sub>A</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	25.852	Carga orgánica aportada por lodo mixto	OLR <sub>1</sub>	kg <sub>sv</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,29
Concentración de ST en lodo mixto	[ST] <sub>1</sub>	% (p/v)	4,0	Caudal aportado por lodo mixto	Q <sub>1</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	150
Concentración de SV en lodo mixto	[SV] <sub>1</sub>	% (p/v)	3	Carga orgánica aportada por aditivo	OLR <sub>2</sub>	kg <sub>sv</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Caudal másico de Lodo mixto	M <sub>1</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	150.000	Caudal aportado por aditivo	Q <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Densidad de Lodo mixto	ρ <sub>1</sub>	g/ml	1,0	Carga orgánica aportada por aditivo	OLR <sub>3</sub>	kg <sub>sv</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de ST en aditivo	[ST] <sub>2</sub>	% (p/v)	0	Caudal aportado por aditivo	Q <sub>3</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de SV en aditivo	[SV] <sub>2</sub>	% (p/v)	0	Caudal total de lodo a digestión (1 solo digestor)	Q <sub>D</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	150
Caudal másico de aditivo	M <sub>2</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	0	Carga orgánica total a digestión	OLR <sub>D</sub>	kg <sub>sv</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,29
Densidad de aditivo	ρ <sub>2</sub>	g/ml	1	Concentración de ST a digestión	[ST] <sub>D</sub>	% (p/v)	4,0
Concentración de ST en aditivo	[ST] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	[SV] <sub>D</sub>	% (p/v)	3,0
Concentración de SV en aditivo	[SV] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	% <sub>sv</sub>	%	75,00
Caudal másico de aditivo	M <sub>3</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	q <sub>h,D1</sub>	día	23,31
Densidad de aditivo	ρ <sub>3</sub>	g/ml	1				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	V <sub>D,útil</sub>	m <sup>3</sup>	3.497	Producción diaria de biogás	V <sub>gas</sub>	Nm <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1.454
BMP Lodo mixto	BMP <sub>1</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SV</sub> valim <sup>-1</sup>	0,21	Caudal de lodo salida digestor	Q <sub>SD</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	150
BMP Aditivo	BMP <sub>2</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SV</sub> valim <sup>-1</sup>	0	Concentración de ST en salida digestor	[ST] <sub>SD</sub>	% (p/v)	2,9
BMP Aditivo	BMP <sub>3</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SV</sub> valim <sup>-1</sup>	0	Concentración de SV en salida digestor	[SV] <sub>SD</sub>	% (p/v)	1,9
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	%CH <sub>4</sub>	%	65	% Materia volátil en lodo digerido	% <sub>SSV</sub>	%	65,75
% Reducción de SV en digestión	%R <sub>SV</sub>	%	36	Sólidos volátiles eliminados en digestión	SV <sub>elim</sub>	kg SV·día <sup>-1</sup>	1.620
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Calor específico del lodo	Ce <sub>lodo</sub>	kcal·m <sup>-3</sup> ·°C <sup>-1</sup>	1.000	Producción diaria de biogás a 35°C	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·día <sup>-1</sup>	1.454
Temperatura del lodo espesado	T <sub>F</sub>	°C	15	Producción horaria de biogás a 35°C	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	61

**Tabla A.1.1.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con lodo mixto, del 1<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 1 (Segunda parte).**

Temperatura de digestión	$T_D$	°C	33	Producción horaria de biogás (potencia)	$Pot_{V, gas}$	Kw	352
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT \text{ caldera}}$	-	0,9	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	kcal·h <sup>-1</sup>	112.500
Temperatura lodo fresco entrada a inter. caldera	$T_{Fe}$	°C	33	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	kcal·h <sup>-1</sup>	13.904
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	$T_{Fs}$	°C	34	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	kcal·h <sup>-1</sup>	140.449
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{In}$	°C	37,39
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	m <sup>2</sup>	8,17
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	kcal·h <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ·°C <sup>-1</sup>	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	17,56
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	kcal·h <sup>-1</sup>	158.006
Poder calorífico del biogás (65% de CH <sub>4</sub> )	$PCI_{CH_4}$	kcal·m <sup>-3</sup>	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	33,05
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	27,53
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	54,55

**Tabla A.1.1.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con lodo mixto, del 1<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 1 (Tercera parte).**

SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)				Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Energía generada contenida en el biogás	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	3.080.740
Producción anual de biogás	$Pot_{V,gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	530.654	Potencia total generada en cogeneración	$Pot_{cog}$	kW	411
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$Pot_{elec,cog}$	kW	144
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia térmica de cogeneración	$Pot_{term,cog}$	kW	185
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	159.196
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,9	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	156.055
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7.500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%_{q,aprov}$	%	98,03
DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)				DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	22	Sólidos totales salida digestión (suma 2 digestores)	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	8.760
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	39,8
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	11.400	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	717
Precio e. eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,028
				Energía eléctrica generada en cogeneración (S3D)	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	5.908
				Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	5.492
				% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	51,83
				Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/día <sup>-1</sup>	522
				Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,020
				Coste total (consumo eléctrico + gestión lodos)	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	<b>0,0479</b>



**Tabla A.1.2.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 3%, del 1<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 2 (Primera parte).

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	Q <sub>A</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	25.852	Carga orgánica aportada por lodo mixto	OLR <sub>1</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,18
Concentración de ST en lodo mixto	[ST] <sub>1</sub>	% (p/v)	3,92	Caudal aportado por lodo mixto	Q <sub>1</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	150
Concentración de SV en lodo mixto	[SV] <sub>1</sub>	% (p/v)	2,75	Carga orgánica aportada por levadura	OLR <sub>2</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0,32
Caudal másico de lodo mixto	M <sub>1</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	150.000	Caudal aportado por levadura	Q <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	4,5
Densidad de lodo mixto	ρ <sub>1</sub>	g/ml	1,0	Carga orgánica aportada por aditivo	OLR <sub>3</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de ST en levadura	[ST] <sub>2</sub>	% (p/v)	30,0	Caudal aportado por aditivo	Q <sub>3</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de SV en levadura	[SV] <sub>2</sub>	% (p/v)	24,5	Caudal total de lodo a digestión (1 solo digestor)	Q <sub>D</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	154,5
Caudal másico de levadura	M <sub>2</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	4.500	Carga orgánica total a digestión	OLR <sub>D</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	<b>1,49</b>
Densidad de levadura	ρ <sub>2</sub>	g/ml	1,0	Concentración de ST a digestión	[ST] <sub>D</sub>	% (p/v)	4,7
Concentración de ST en aditivo	[ST] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	[SV] <sub>D</sub>	% (p/v)	3,4
Concentración de SV en aditivo	[SV] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	% <sub>SV</sub>	%	72,30
Caudal másico de aditivo	M <sub>3</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	q <sub>h,D1</sub>	día	22,6
Densidad de aditivo	ρ <sub>3</sub>	g/ml	1				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	V <sub>D,útil</sub>	m <sup>3</sup>	3.497	Producción diaria de biogás	V <sub>gas</sub>	Nm <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	2.169
BMP Lodo mixto	BMP <sub>1</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SValim</sub> <sup>-1</sup>	0,21	Caudal de lodo salida digestor	Q <sub>SD</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	155
BMP levadura	BMP <sub>2</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SValim</sub> <sup>-1</sup>	0,493	Concentración de ST en salida digestor	[ST] <sub>SD</sub>	% (p/v)	3,2
BMP levadura	BMP <sub>3</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SValim</sub> <sup>-1</sup>	0	Concentración de SV en salida digestor	[SV] <sub>SD</sub>	% (p/v)	1,9
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	%CH <sub>4</sub>	%	65	% Materia volátil en lodo digerido	% <sub>SSV</sub>	%	58,95
% Reducción de SV en digestión	%R <sub>SV</sub>	%	45	Sólidos volátiles eliminados en digestión	SV <sub>elim</sub>	kg <sub>SV</sub> ·día <sup>-1</sup>	2.352
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Calor específico del lodo	Ce <sub>lodo</sub>	kcal·m <sup>-3</sup> ·°C <sup>-1</sup>	1000	Producción diaria de biogás a 35°C	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·día <sup>-1</sup>	2.169
Temperatura del lodo espesado	T <sub>F</sub>	°C	15	Producción horaria de biogás a 35°C	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	90

**Tabla A.1.2.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 3%, del 1<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 2 (Segunda parte).**

Temperatura de digestión	$T_D$	°C	33	Producción horaria de biogás (potencia)	$Pot_{V, gas}$	Kw	525
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT \text{ caldera}}$	-	0,9	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	$kcal \cdot h^{-1}$	115.875
Temperatura lodo fresco entrada a inter. Caldera	$T_{Fe}$	°C	33	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	14.322
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	$T_{Fs}$	°C	34	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	144.663
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{in}$	°C	37,39
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	$m^2$	8,41
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	$kcal \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	$m^3 \cdot h^{-1}$	18,08
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	$kcal \cdot h^{-1}$	162.746
Poder calorífico del biogás (65% de $CH_4$ )	$PCI_{CH_4}$	$kcal \cdot m^{-3}$	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	34,04
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	56,33
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	37,67

**Tabla A.1.2.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 3%, del 1<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 2 (Tercera parte).**

				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)			
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)				Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Definición	Símbolo	Unidades	Valores				
				Energía generada contenida en el biogás	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	4.595.951
Producción anual de biogás	$Pot_{V,gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	791.647	Potencia total generada en cogeneración	$Pot_{cog}$	kW	613
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$Pot_{elec,cog}$	kW	214
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia térmica de cogeneración	$Pot_{term,cog}$	kW	276
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	237.494
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,9	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	160.737
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7.500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%q_{aprov}$	%	67,68
DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO				DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	22	Sólidos totales salida digestión (suma 2 digestores)	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	9.755
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	44,3
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	11.400	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	798
Precio e.eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,031
Distancia transporte de residuos	Dist	$km \cdot día^{-1}$	0	Energía eléctrica generada en cogeneración (S3D)	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	8.814
Coste transporte 1 (referido a kms)	$C_{trans,1}$	€/km <sup>1</sup>	0,00	Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	2.586
Coste transporte 2 (referido a peso transportado)	$C_{trans,2}$	€/Tm <sup>1</sup>	0,0	% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	77,32
Inversión estimada equipos pretratamiento	Inv	€	0	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/día <sup>1</sup>	246
Periodo inversión	n	años	10,00	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,010
Interés inversión	i	_	0,10	Coste consumo eléctrico + gestión lodos	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,040
Precio compra/venta residuo	$C_{residuo}$	€/Tm	<b>27,6</b>	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/día <sup>1</sup>	0

**Tabla A.1.2.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 3%, del 1<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 2 (Cuarta parte).

Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,000
Cuota amortización	$C_{amort}$	–	0,163
Anualidad amortización	$C_{amort}$	€/año <sup>-1</sup>	0
Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€/día <sup>-1</sup>	0
Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,0000
Coste compra/venta levadura	$C_{trans}$	€/día <sup>-1</sup>	249
Coste compra/venta levadura	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,010
<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,050
<b>COSTE TOTAL cuando precio levadura=0</b>	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,040

**Tabla A.1.3.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con MeOH 12gDQO/L, del 1<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 7 (Primera parte).

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	Q <sub>A</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	25.852	Carga orgánica aportada por lodo mixto	OLR <sub>1</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,18
Concentración de ST en lodo mixto	[ST] <sub>1</sub>	% (p/v)	3,92	Caudal aportado por lodo mixto	Q <sub>1</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	150
Concentración de SV en lodo mixto	[SV] <sub>1</sub>	% (p/v)	2,75	Carga orgánica aportada por metanol	OLR <sub>2</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0,34
Caudal másico de lodo mixto	M <sub>1</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	150.000	Caudal aportado por metanol	Q <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,52
Densidad de lodo mixto	ρ <sub>1</sub>	g/ml	1,0	Carga orgánica aportada por aditivo	OLR <sub>3</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de ST en metanol	[ST] <sub>2</sub>	% (p/v)	100,0	Caudal aportado por aditivo	Q <sub>3</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de SV en metanol	[SV] <sub>2</sub>	% (p/v)	100,0	Caudal total de lodo a digestión (1 solo digestor)	Q <sub>D</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	151,5
Caudal másico de metanol	M <sub>2</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	1.200	Carga orgánica total a digestión	OLR <sub>D</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	<b>1,52</b>
Densidad de metanol	ρ <sub>2</sub>	g/ml	0,8	Concentración de ST a digestión	[ST] <sub>D</sub>	% (p/v)	4,7
Concentración de ST en aditivo	[ST] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	[SV] <sub>D</sub>	% (p/v)	3,5
Concentración de SV en aditivo	[SV] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	% <sub>SV</sub>	%	75,21
Caudal másico de aditivo	M <sub>3</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	q <sub>h,D1</sub>	día	23,1
Densidad de aditivo	ρ <sub>3</sub>	g/ml	1				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	V <sub>D,útil</sub>	m <sup>3</sup>	3.497	Producción diaria de biogás	V <sub>gas</sub>	Nm <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1.931
BMP Lodo mixto	BMP <sub>1</sub>	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ·kg <sub>SValim</sub> <sup>-1</sup>	0,21	Caudal de lodo salida digestor	Q <sub>SD</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	152
BMP metanol	BMP <sub>2</sub>	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ·kg <sub>SValim</sub> <sup>-1</sup>	0,324	Concentración de ST en salida digestor	[ST] <sub>SD</sub>	% (p/v)	3,3
BMP Aditivo (NADA)	BMP <sub>3</sub>	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ·kg <sub>SValim</sub> <sup>-1</sup>	0	Concentración de SV en salida digestor	[SV] <sub>SD</sub>	% (p/v)	2,1
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	%CH <sub>4</sub>	%	65	% Materia volátil en lodo digerido	% <sub>SSV</sub>	%	64,55
% Reducción de SV en digestión	%R <sub>SV</sub>	%	40	Sólidos volátiles eliminados en digestión	SV <sub>elim</sub>	kg <sub>SV</sub> ·día <sup>-1</sup>	2.130
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Calor específico del lodo	Ce <sub>lodo</sub>	kcal·m <sup>-3</sup> ·°C <sup>-1</sup>	1.000	Producción diaria de biogás a 35°C	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·día <sup>-1</sup>	1.931
Temperatura del lodo espesado	T <sub>F</sub>	°C	15	Producción horaria de biogás a 35°C	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	80

**Tabla A.1.3.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con MeOH 12gDQO/L, del 1<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 7 (Segunda parte).**

Temperatura de digestión	$T_D$	°C	33	Producción horaria de biogás (potencia)	$Pot_{V, gas}$	Kw	467
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT \text{ caldera}}$	-	0,9	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	$kcal \cdot h^{-1}$	113.639
Temperatura lodo fresco entrada a inter. Caldera	$T_{Fe}$	°C	33	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	14.045
Temperatura lodo fresco salida inter. Caldera	$T_{Fs}$	°C	34	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	141.872
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{In}$	°C	37,39
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	$m^2$	8,25
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	$kcal \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	$m^3 \cdot h^{-1}$	17,73
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	$kcal \cdot h^{-1}$	159.606
Poder calorífico del biogás (65% de $CH_4$ )	$PCI_{CH_4}$	$kcal \cdot m^{-3}$	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	33,38
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	47,07
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	41,49

**Tabla A.1.3.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con MeOH 12gDQO/L, del 1<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 7 (Tercera parte).**

				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)			
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)				Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Definición	Símbolo	Unidades	Valores				
				Energía generada contenida en el biogás	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	4.091.517
Producción anual de biogás	$Pot_{v,gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	704.759	Potencia total generada en cogeneración	$Pot_{cog}$	kW	546
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$Pot_{elec,cog}$	kW	191
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia térmica de cogeneración	$Pot_{term,cog}$	kW	245
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	211.428
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,9	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	157.635
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7.500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%_{q,aprov}$	%	74,56
DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO				DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	22	Sólidos totales salida digestión (suma 2 digestores)	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	9.900
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	45,0
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	11.400	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	810
Precio e.eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,031
Distancia transporte de residuos	Dist	$km \cdot día^{-1}$	0	Energía eléctrica generada en cogeneración (S3D)	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	7.847
Coste transporte 1 (referido a kms)	$C_{trans,1}$	€·km <sup>-1</sup>	0,00	Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	3.553
Coste transporte 2 (referido a peso transportado)	$C_{trans,2}$	€·Tm <sup>-1</sup>	0,0	% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	68,83
Inversión estimada equipos pretratamiento	Inv	€	0	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€·día <sup>-1</sup>	338
Periodo inversión	n	años	10,00	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€·m <sup>-3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,013
Interés inversión	i	_	0,10	Coste consumo eléctrico + gestión lodos	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> <sub>agua trat.</sub>	<b>0,044</b>
Precio compra/venta residuo	$C_{residuo}$	€/Tm	<b>60,4</b>	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€·d <sup>-1</sup>	0

**Tabla A.1.3.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con MeOH 12gDQO/L, del 1<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 7 (Cuarta parte).

	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,000
	Cuota amortización	$C_{amort}$	–	0,163
	Anualidad amortización	$C_{amort}$	€·año <sup>-1</sup>	0
	Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	0
	Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,0000
	Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	145
	Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,006
	<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	<b>0,050</b>
	<b>COSTE TOTAL cuando precio aditivo=0</b>	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	<b>0,044</b>

**Tabla A.1.4.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 1%, del 2º bloque de ensayos – Comb. 2 (Primera parte).**

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	Q <sub>A</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	25.852	Carga orgánica aportada por Lodo mixto	OLR <sub>1</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,18
Concentración de ST en Lodo mixto	[ST] <sub>1</sub>	% (p/v)	3,92	Caudal aportado por lodo mixto	Q <sub>1</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	150
Concentración de SV en lodo mixto	[SV] <sub>1</sub>	% (p/v)	2,75	Carga orgánica aportada por levadura	OLR <sub>2</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0,11
Caudal másico de lodo mixto	M <sub>1</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	150.000	Caudal aportado por levadura	Q <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,5
Densidad de lodo mixto	ρ <sub>1</sub>	g/ml	1,0	Carga orgánica aportada por aditivo	OLR <sub>3</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de ST en levadura	[ST] <sub>2</sub>	% (p/v)	30,0	Caudal aportado por aditivo	Q <sub>3</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de SV en levadura	[SV] <sub>2</sub>	% (p/v)	24,5	Caudal total de lodo a digestión (1 solo digestor)	Q <sub>D</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	151,5
Caudal másico de levadura	M <sub>2</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	1.500	Carga orgánica total a digestión	OLR <sub>D</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	<b>1,28</b>
Densidad de levadura	ρ <sub>2</sub>	g/ml	1,0	Concentración de ST a digestión	[ST] <sub>D</sub>	% (p/v)	4,2
Concentración de ST en aditivo	[ST] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	[SV] <sub>D</sub>	% (p/v)	3,0
Concentración de SV en aditivo	[SV] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	% <sub>SV</sub>	%	70,97
Caudal másico de aditivo	M <sub>3</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	q <sub>h,D1</sub>	día	23,1
Densidad de aditivo	ρ <sub>3</sub>	g/ml	1				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	V <sub>D,útil</sub>	m <sup>3</sup>	3.497	Producción diaria de biogás	V <sub>gas</sub>	Nm <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1.611
BMP Lodo mixto	BMP <sub>1</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SV</sub> valim <sup>-1</sup>	0,21	Caudal de lodo salida digestor	Q <sub>SD</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	152
BMP Levadura	BMP <sub>2</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SV</sub> valim <sup>-1</sup>	0,493	Concentración de ST en salida digestor	[ST] <sub>SD</sub>	% (p/v)	2,8
BMP Aditivo	BMP <sub>3</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SV</sub> valim <sup>-1</sup>	0	Concentración de SV en salida digestor	[SV] <sub>SD</sub>	% (p/v)	1,6
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	%CH <sub>4</sub>	%	65	% Materia volátil en lodo digerido	% <sub>SSV</sub>	%	57,35
% Reducción de SV en digestión	%R <sub>SV</sub>	%	45	Sólidos volátiles eliminados en digestión	SV <sub>elim</sub>	kg <sub>SV</sub> ·día <sup>-1</sup>	2.022
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Calor específico del lodo	Ce <sub>lodo</sub>	kcal·m <sup>-3</sup> ·°C <sup>-1</sup>	1.000	Producción diaria de biogás a 35°C	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·día <sup>-1</sup>	1.611
Temperatura del lodo espesado	T <sub>F</sub>	°C	15	Producción horaria de biogás a 35°C	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	67

**Tabla A.1.4.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 1%, del 2º bloque de ensayos – Comb. 2 (Segunda parte).

Temperatura de digestión	$T_D$	°C	33	Producción horaria de biogás (potencia)	$Pot_{V, gas}$	Kw	390
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT \text{ caldera}}$	-	0,9	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	kcal·h <sup>-1</sup>	113.625
Temperatura lodo fresco entrada a inter. Caldera	$T_{Fe}$	°C	33	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	kcal·h <sup>-1</sup>	14.044
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	$T_{Fs}$	°C	34	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	kcal·h <sup>-1</sup>	141.854
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{ln}$	°C	37,39
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	m <sup>2</sup>	8,25
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	kcal·h <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ·°C <sup>-1</sup>	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	17,73
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	kcal·h <sup>-1</sup>	159.586
Poder calorífico del biogás (65% de CH <sub>4</sub> )	$PCI_{CH_4}$	kcal·m <sup>-3</sup>	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	33,38
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	33,77
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	49,71

**Tabla A.1.4.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 1%, del 2º bloque de ensayos – Comb. 2 (Tercera parte).**

				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)			
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)				Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Definición	Símbolo	Unidades	Valores				
				Energía generada contenida en el biogás	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	3.414.658
Producción anual de biogás	$Pot_{V,gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	588.171	Potencia total generada en cogeneración	$Pot_{cog}$	kW	455
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$Pot_{elec,cog}$	kW	159
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia térmica de cogeneración	$Pot_{term,cog}$	kW	205
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	176.451
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,9	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	157.615
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7.500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%q_{aprov}$	%	89,33
DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO				DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	22	Sólidos totales salida digestión (suma 2 digestores)	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	8.617
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	39,2
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	11.400	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	705
Precio energía eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,027
Distancia transporte de residuos	Dist	$km \cdot día^{-1}$	0	Energía eléctrica generada en cogeneración (S3D)	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	6.549
Coste transporte 1 (referido a kms)	$C_{trans,1}$	€·km <sup>-1</sup>	0,00	Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	4.851
Coste transporte 2 (referido a peso transportado)	$C_{trans,2}$	€·Tm <sup>-1</sup>	0,0	% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	57,44
Inversión estimada equipos pretratamiento	Inv	€	0	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€·día <sup>-1</sup>	461
Periodo inversión	n	años	10,00	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	0,018
Interés inversión	i	_	0,10	Coste consumo eléctrico + gestión lodos	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	<b>0,045</b>
Precio compra/venta residuo	$C_{residuo}$	€/Tm	44,9	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	0

**Tabla A.1.4.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 1%, del 2º bloque de ensayos – Comb. 2 (Cuarta parte).

Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,000
Cuota amortización	$C_{amort}$	–	0,163
Anualidad amortización	$C_{amort}$	€·año <sup>-1</sup>	0
Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	0
Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,0000
Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	135
Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,005
<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,050
<b>COSTE TOTAL cuando precio aditivo=0</b>	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,045

**Tabla A.1.5.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 2%, del 2º bloque de ensayos – Comb. 3 (Primera parte).**

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	Q <sub>A</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	25.852	Carga orgánica aportada por lodo mixto	OLR <sub>1</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,18
Concentración de ST en lodo mixto	[ST] <sub>1</sub>	% (p/v)	3,92	Caudal aportado por lodo mixto	Q <sub>1</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	150
Concentración de SV en lodo mixto	[SV] <sub>1</sub>	% (p/v)	2,75	Carga orgánica aportada por levadura	OLR <sub>2</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0,21
Caudal másico de lodo mixto	M <sub>1</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	150.000	Caudal aportado por levadura	Q <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	3,0
Densidad de lodo mixto	ρ <sub>1</sub>	g/ml	1,0	Carga orgánica aportada por aditivo	OLR <sub>3</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de ST en levadura	[ST] <sub>2</sub>	% (p/v)	30,0	Caudal aportado por aditivo	Q <sub>3</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de SV en levadura	[SV] <sub>2</sub>	% (p/v)	24,5	Caudal total de lodo a digestión (1 solo digestor)	Q <sub>D</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	153,0
Caudal másico de levadura	M <sub>2</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	3.000	Carga orgánica total a digestión	OLR <sub>D</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	<b>1,39</b>
Densidad de levadura	ρ <sub>2</sub>	g/ml	1,0	Concentración de ST a digestión	[ST] <sub>D</sub>	% (p/v)	4,4
Concentración de ST en aditivo	[ST] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	[SV] <sub>D</sub>	% (p/v)	3,2
Concentración de SV en aditivo	[SV] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	% <sub>SV</sub>	%	71,68
Caudal másico de aditivo	M <sub>3</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	q <sub>h,D1</sub>	día	22,9
Densidad de aditivo	ρ <sub>3</sub>	g/ml	1				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	V <sub>D,útil</sub>	m <sup>3</sup>	3.497	Producción diaria de biogás	V <sub>gas</sub>	Nm <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1.890
BMP Lodo mixto	BMP <sub>1</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kgSV <sub>alim</sub> <sup>-1</sup>	0,21	Caudal de lodo salida digestor	Q <sub>SD</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	153
BMP Levadura	BMP <sub>2</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kgSV <sub>alim</sub> <sup>-1</sup>	0,493	Concentración de ST en salida digestor	[ST] <sub>SD</sub>	% (p/v)	3,0
BMP Aditivo	BMP <sub>3</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kgSV <sub>alim</sub> <sup>-1</sup>	0	Concentración de SV en salida digestor	[SV] <sub>SD</sub>	% (p/v)	1,7
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	%CH <sub>4</sub>	%	65	% Materia volátil en lodo digerido	% <sub>SSV</sub>	%	58,20
% Reducción de SV en digestión	%R <sub>SV</sub>	%	45	Sólidos volátiles eliminados en digestión	SV <sub>elim</sub>	kg <sub>SV</sub> ·día <sup>-1</sup>	2.187
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Calor específico del lodo	Ce <sub>lodo</sub>	kcal·m <sup>-3</sup> ·°C <sup>-1</sup>	1.000	Producción diaria de biogás a 35°C	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·día <sup>-1</sup>	1.890
Temperatura del lodo espesado	T <sub>F</sub>	°C	15	Producción horaria de biogás a 35°C	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	79

**Tabla A.1.5.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 2%, del 2º bloque de ensayos – Comb. 3 (Segunda parte).

Temperatura de digestión	$T_D$	°C	33	Producción horaria de biogás (potencia)	$Pot_{V, gas}$	Kw	457
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT \text{ caldera}}$	-	0,9	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	$kcal \cdot h^{-1}$	114.750
Temperatura lodo fresco entrada a inter. Caldera	$T_{Fe}$	°C	33	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	14.183
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	$T_{Fs}$	°C	34	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	143.258
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{In}$	°C	37,39
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	$m^2$	8,33
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	$kcal \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	$m^3 \cdot h^{-1}$	17,91
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	$kcal \cdot h^{-1}$	161.166
Poder calorífico del biogás (65% de $CH_4$ )	$PCI_{CH_4}$	$kcal \cdot m^{-3}$	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	33,71
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	45,05
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	42,80

**Tabla A.1.5.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 2%, del 2º bloque de ensayos – Comb. 3 (Tercera parte).**

				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)			
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)				Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Energía generada contenida en el biogás	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	4.005.305
Producción anual de biogás	$Pot_{V,gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	689.909	Potencia total generada en cogeneración	$Pot_{cog}$	kW	534
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$Pot_{elec,cog}$	kW	187
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia térmica de cogeneración	$Pot_{term,cog}$	kW	240
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	206.973
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,9	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	159.176
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7.500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%_{q,aprov}$	%	76,91
DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO				DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	22	Sólidos totales salida digestión (suma 2 digestores)	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	9.186
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	41,8
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	11.400	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	752
Precio energía eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,029
Distancia transporte de residuos	Dist	$km \cdot día^{-1}$	0	Energía eléctrica generada en cogeneración (S3D)	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	7.681
Coste transporte 1 (referido a kms)	$C_{trans,1}$	€/km <sup>-1</sup>	0,00	Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	3.719
Coste transporte 2 (referido a peso transportado)	$C_{trans,2}$	€/Tm <sup>-1</sup>	0,0	% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	67,38
Inversión estimada equipos pretratamiento	Inv	€	0	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/día <sup>-1</sup>	353
Periodo inversión	n	años	10,00	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,014
Interés inversión	i	_	0,10	Coste consumo eléctrico + gestión lodos	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	<b>0,043</b>
Precio compra/venta residuo	$C_{residuo}$	€/Tm	<b>31,3</b>	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/d <sup>-1</sup>	0

**Tabla A.1.5.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 2% del 2º bloque de ensayos – Comb. 3 (Cuarta parte).

Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,000
Cuota amortización	$C_{amort}$	–	0,163
Anualidad amortización	$C_{amort}$	€/año <sup>-1</sup>	0
Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€/día <sup>-1</sup>	0
Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,0000
Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€/día <sup>-1</sup>	188
Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,007
<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	<b>0,050</b>
<b>COSTE TOTAL cuando precio aditivo=0</b>	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	<b>0,043</b>

**Tabla A.1.6.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con MeOH 16gDQO/L, del 2º bloque de ensayos – Comb. 4 (Primera parte).

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	Q <sub>A</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	25.852	Carga orgánica aportada por lodo mixto	OLR <sub>1</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,18
Concentración de ST en lodo mixto	[ST] <sub>1</sub>	% (p/v)	3,92	Caudal aportado por lodo mixto	Q <sub>1</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	150
Concentración de SV en lodo mixto	[SV] <sub>1</sub>	% (p/v)	2,75	Carga orgánica aportada por metanol	OLR <sub>2</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0,46
Caudal másico de lodo mixto	M <sub>1</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	150.000	Caudal aportado por metanol	Q <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	2,03
Densidad de lodo mixto	ρ <sub>1</sub>	g/ml	1,0	Carga orgánica aportada por aditivo	OLR <sub>3</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de ST en metanol	[ST] <sub>2</sub>	% (p/v)	100,0	Caudal aportado por aditivo	Q <sub>3</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de SV en metanol	[SV] <sub>2</sub>	% (p/v)	100,0	Caudal total de lodo a digestión (1 solo digestor)	Q <sub>D</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	152,0
Caudal másico de metanol	M <sub>2</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	1.600	Carga orgánica total a digestión	OLR <sub>D</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,64
Densidad de metanol	ρ <sub>2</sub>	g/ml	0,8	Concentración de ST a digestión	[ST] <sub>D</sub>	% (p/v)	4,9
Concentración de ST en aditivo	[ST] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	[SV] <sub>D</sub>	% (p/v)	3,8
Concentración de SV en aditivo	[SV] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	% <sub>SV</sub>	%	76,54
Caudal másico de aditivo	M <sub>3</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	q <sub>h,D1</sub>	día	23,0
Densidad de aditivo	ρ <sub>3</sub>	g/ml	1				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	V <sub>D,útil</sub>	m <sup>3</sup>	3.497	Producción diaria de biogás	V <sub>gas</sub>	Nm <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	2.130
BMP Lodo mixto	BMP <sub>1</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SV</sub> valim <sup>-1</sup>	0,21	Caudal de lodo salida digestor	Q <sub>SD</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	152
BMP Metanol	BMP <sub>2</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SV</sub> valim <sup>-1</sup>	0,324	Concentración de ST en salida digestor	[ST] <sub>SD</sub>	% (p/v)	3,4
BMP Aditivo (NADA)	BMP <sub>3</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SV</sub> valim <sup>-1</sup>	0	Concentración de SV en salida digestor	[SV] <sub>SD</sub>	% (p/v)	2,3
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	%CH <sub>4</sub>	%	65	% Materia volátil en lodo digerido	% <sub>SSV</sub>	%	66,18
% Reducción de SV en digestión	%R <sub>SV</sub>	%	40	Sólidos volátiles eliminados en digestión	SV <sub>elim</sub>	kg <sub>SV</sub> ·día <sup>-1</sup>	2.290
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Calor específico del lodo	Ce <sub>lodo</sub>	kcal·m <sup>-3</sup> ·°C <sup>-1</sup>	1.000	Producción diaria de biogás a 35°C	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·día <sup>-1</sup>	2.130
Temperatura del lodo espesado	T <sub>F</sub>	°C	15	Producción horaria de biogás a 35°C	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	89

**Tabla A.1.6.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con MeOH 16gDQO/L, del 2ª bloque de ensayos – Comb. 4 (Segunda parte).

Temperatura de digestión	$T_D$	°C	33	Producción horaria de biogás (potencia)	$Pot_{V, gas}$	Kw	515
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT \text{ caldera}}$	-	0,9	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	$kcal \cdot h^{-1}$	114.019
Temperatura lodo fresco entrada a inter. caldera	$T_{Fe}$	°C	33	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	14.092
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	$T_{Fs}$	°C	34	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	142.346
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{in}$	°C	37,39
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	$m^2$	8,28
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	$kcal \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	$m^3 \cdot h^{-1}$	17,79
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	$kcal \cdot h^{-1}$	160.139
Poder calorífico del biogás (65% de $CH_4$ )	$PCI_{CH_4}$	$kcal \cdot m^{-3}$	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	33,49
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	55,27
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	37,73

**Tabla A.1.6.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con MeOH 16gDQO/L, del 2º bloque de ensayos – Comb. 4 (Tercera parte).

				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)			
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)				Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Definición	Símbolo	Unidades	Valores				
				Energía generada contenida en el biogás	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	4.514.018
Producción anual de biogás	$Pot_{V,gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	777.534	Potencia total generada en cogeneración	$Pot_{cog}$	kW	602
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$Pot_{elec,cog}$	kW	211
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia térmica de cogeneración	$Pot_{term,cog}$	kW	271
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	233.260
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,9	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	158.162
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7.500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%q_{aprov}$	%	67,80
DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO				DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	22	Sólidos totales salida digestión (suma 2 digestores)	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	10.380
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	47,2
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	11.400	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	849
Precio energía eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,033
Distancia transporte de residuos	Dist	$km \cdot día^{-1}$	0	Energía eléctrica generada en cogeneración (S3D)	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	8.657
Coste transporte 1 (referido a kms)	$C_{trans,1}$	€/km	0,00	Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	2.743
Coste transporte 2 (referido a peso transportado)	$C_{trans,2}$	€/Tm	0,0	% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	75,94
Inversión estimada equipos pretratamiento	Inv	€	0	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/día	261
Periodo inversión	n	años	10,00	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,010
Interés inversión	i	-	0,10	Coste consumo eléctrico + gestión lodos	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,043
Precio compra/venta residuo	$C_{residuo}$	€/Tm	<b>114,2</b>	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/día	0

**Tabla A.1.6.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con MeOH 16gDQO/L, del 2º bloque de ensayos – Comb. 4 (Cuarta parte).

Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,000
Cuota amortización	$C_{amort}$	–	0,163
Anualidad amortización	$C_{amort}$	€/año <sup>-1</sup>	0
Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€/día <sup>-1</sup>	0
Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,0000
Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€/día <sup>-1</sup>	183
Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,007
<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	<b>0,050</b>
<b>COSTE TOTAL cuando precio aditivo=0</b>	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	<b>0,043</b>

**Tabla A.1.7.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B, con lodo mixto del 3<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 2 (Primera parte).**

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	Q <sub>A</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	78.500	Carga orgánica aportada por lodo mixto	OLR <sub>1</sub>	kg <sub>sv</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,72
Concentración de ST en lodo mixto	[ST] <sub>1</sub>	% (p/v)	4,1	Caudal aportado por lodo mixto	Q <sub>1</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	350
Concentración de SV en lodo mixto	[SV] <sub>1</sub>	% (p/v)	2,99	Carga orgánica aportada por aditivo	OLR <sub>2</sub>	kg <sub>sv</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Caudal másico de lodo mixto	M <sub>1</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	350.000	Caudal aportado por aditivo	Q <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Densidad de lodo mixto	ρ <sub>1</sub>	g/ml	1,0	Carga orgánica aportada por aditivo	OLR <sub>3</sub>	kg <sub>sv</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de ST en aditivo	[ST] <sub>2</sub>	% (p/v)	0	Caudal aportado por aditivo	Q <sub>3</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de SV en aditivo	[SV] <sub>2</sub>	% (p/v)	0	Caudal total de lodo a digestión (1 solo digestor)	Q <sub>D</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	350
Caudal másico de aditivo	M <sub>2</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	0	Carga orgánica total a digestión	OLR <sub>D</sub>	kg <sub>sv</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,72
Densidad de aditivo	ρ <sub>2</sub>	g/ml	1	Concentración de ST a digestión	[ST] <sub>D</sub>	% (p/v)	4,1
Concentración de ST en aditivo	[ST] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	[SV] <sub>D</sub>	% (p/v)	3,0
Concentración de SV en aditivo	[SV] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	% <sub>SV</sub>	%	73,11
Caudal másico de aditivo	M <sub>3</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	q <sub>h,D1</sub>	día	17,4
Densidad de aditivo	ρ <sub>3</sub>	g/ml	1				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	V <sub>D,útil</sub>	m <sup>3</sup>	6.100	Producción diaria de biogás	V <sub>gas</sub>	Nm <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	3.381
BMP Lodo mixto	BMP <sub>1</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SValim</sub> <sup>-1</sup>	0,21	Caudal de lodo salida digestor	Q <sub>SD</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	350
BMP Aditivo	BMP <sub>2</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SValim</sub> <sup>-1</sup>	0	Concentración de ST en salida digestor	[ST] <sub>SD</sub>	% (p/v)	2,7
BMP Aditivo	BMP <sub>3</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SValim</sub> <sup>-1</sup>	0	Concentración de SV en salida digestor	[SV] <sub>SD</sub>	% (p/v)	1,6
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	%CH <sub>4</sub>	%	65	% Materia volátil en lodo digerido	% <sub>SSV</sub>	%	59,92
% Reducción de SV en digestión	%R <sub>SV</sub>	%	45	Sólidos volátiles eliminados en digestión	SV <sub>elim</sub>	kg <sub>sv</sub> ·día <sup>-1</sup>	4.709
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Calor específico del lodo	Ce <sub>lodo</sub>	kcal·m <sup>-3</sup> ·°C <sup>-1</sup>	1.000	Producción diaria de biogás a 35°C	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·día <sup>-1</sup>	3.381
Temperatura del lodo espesado	T <sub>F</sub>	°C	15	Producción horaria de biogás a 35°C	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	141

**Tabla A.1.7.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con lodo mixto, del 3<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 2 (Segunda parte).**

Temperatura de digestión	$T_D$	°C	35	Producción horaria de biogás (potencia)	$Pot_{v, gas}$	Kw	818
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT \text{ caldera}}$	-	0,9	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	$kcal \cdot h^{-1}$	291.667
Temperatura lodo fresco entrada a inter. caldera	$T_{Fe}$	°C	35	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	36.049
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	$T_{Fs}$	°C	36	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	364.128
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{In}$	°C	35,38
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	m <sup>2</sup>	22,37
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	$kcal \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	45,52
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	$kcal \cdot h^{-1}$	409.644
Poder calorífico del biogás (65% de CH <sub>4</sub> )	$PCI_{CH_4}$	$kcal \cdot m^{-3}$	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	85,68
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	55,20
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	60,82

**Tabla A.1.7.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con lodo mixto, del 3<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 2 (Tercera parte).**

SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)			
				Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Energía generada contenida en el biogás	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	7.164.433
Producción anual de biogás	$Pot_{V,gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	1.234.065	Potencia total generada en cogeneración	$Pot_{cog}$	kW	955
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$Pot_{elec,cog}$	kW	334
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia térmica de cogeneración	$Pot_{term,cog}$	kW	430
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	370.220
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,9	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	404.587
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7.500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%q_{aprov}$	%	109,28
DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)				DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	20	Sólidos totales salida digestión (suma 3 digestores)	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	28.817
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	144,1
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	37.000	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	2.594
Precio energía eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,033
				Energía eléctrica generada en cogeneración (S3D)	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	20.610
				Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	16.390
				% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	55,70
				Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/día	1.557
				Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,020
				Coste total (consumo eléctrico + gestión lodos)	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	<b>0,053</b>



**Tabla A.1.8.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con levadura al 1%, del 3<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 3 (Primera parte).**

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	Q <sub>A</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	78.500	Carga orgánica aportada por lodo mixto	OLR <sub>1</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,72
Concentración de ST en lodo mixto	[ST] <sub>1</sub>	% (p/v)	4,1	Caudal aportado por lodo mixto	Q <sub>1</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	350
Concentración de SV en lodo mixto	[SV] <sub>1</sub>	% (p/v)	2,99	Carga orgánica aportada por levadura	OLR <sub>2</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0,14
Caudal másico de lodo mixto	M <sub>1</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	350.000	Caudal aportado por levadura	Q <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	3,5
Densidad de lodo mixto	ρ <sub>1</sub>	g/ml	1,0	Carga orgánica aportada por aditivo	OLR <sub>3</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de ST en levadura	[ST] <sub>2</sub>	% (p/v)	30,0	Caudal aportado por aditivo	Q <sub>3</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de SV en levadura	[SV] <sub>2</sub>	% (p/v)	24,5	Caudal total de lodo a digestión (1 solo digestor)	Q <sub>D</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	353,5
Caudal másico de levadura	M <sub>2</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	3.500	Carga orgánica total a digestión	OLR <sub>D</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	<b>1,86</b>
Densidad de levadura	ρ <sub>2</sub>	g/ml	1,0	Concentración de ST a digestión	[ST] <sub>D</sub>	% (p/v)	4,3
Concentración de ST en aditivo	[ST] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	[SV] <sub>D</sub>	% (p/v)	3,2
Concentración de SV en aditivo	[SV] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	% <sub>SV</sub>	%	73,69
Caudal másico de aditivo	M <sub>3</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	q <sub>h,D1</sub>	día	17,3
Densidad de aditivo	ρ <sub>3</sub>	g/ml	1				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	V <sub>D,útil</sub>	m <sup>3</sup>	6.100	Producción diaria de biogás	V <sub>gas</sub>	Nm <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	4.056
BMP Lodo mixto	BMP <sub>1</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SValim</sub> <sup>-1</sup>	0,21	Caudal de lodo salida digestor	Q <sub>SD</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	354
BMP Levadura	BMP <sub>2</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SValim</sub> <sup>-1</sup>	0,512	Concentración de ST en salida digestor	[ST] <sub>SD</sub>	% (p/v)	2,7
BMP Aditivo	BMP <sub>3</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SValim</sub> <sup>-1</sup>	0	Concentración de SV en salida digestor	[SV] <sub>SD</sub>	% (p/v)	1,6
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	%CH <sub>4</sub>	%	65	% Materia volátil en lodo digerido	% <sub>SSV</sub>	%	58,34
% Reducción de SV en digestión	%R <sub>SV</sub>	%	50	Sólidos volátiles eliminados en digestión	SV <sub>elim</sub>	kg <sub>SV</sub> ·día <sup>-1</sup>	5.661
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Calor específico del lodo	Ce <sub>lodo</sub>	kcal·m <sup>-3</sup> ·°C <sup>-1</sup>	1.000	Producción diaria de biogás a 35°C	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·día <sup>-1</sup>	4.056
Temperatura del lodo espesado	T <sub>F</sub>	°C	15	Producción horaria de biogás a 35°C	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	169

**Tabla A.1.8.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con levadura al 1%, del 3ª bloque de ensayos – Comb. 3 (Segunda parte).

Temperatura de digestión	$T_D$	°C	35	Producción horaria de biogás (potencia)	$Pot_{v, gas}$	Kw	981
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT \text{ caldera}}$	-	0,9	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	kcal·h <sup>-1</sup>	294.583
Temperatura lodo fresco entrada a inter. caldera	$T_{Fe}$	°C	35	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	kcal·h <sup>-1</sup>	36.409
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	$T_{Fs}$	°C	36	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	kcal·h <sup>-1</sup>	367.769
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{In}$	°C	35,38
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	m <sup>2</sup>	22,59
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	kcal·h <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ·°C <sup>-1</sup>	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	45,97
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	kcal·h <sup>-1</sup>	413.741
Poder calorífico del biogás (65% de CH <sub>4</sub> )	$PCI_{CH_4}$	kcal·m <sup>-3</sup>	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	86,53
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	82,48
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	51,20

**Tabla A.1.8.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con levadura al 1% del 3<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 3 (Tercera parte).**

				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)			
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)				Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Definición	Símbolo	Unidades	Valores				
				Energía generada contenida en el biogás	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	8.595.722
Producción anual de biogás	$Pot_{v,gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	1.480.603	Potencia total generada en cogeneración	$Pot_{cog}$	kW	1146
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$Pot_{elec,cog}$	kW	401
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia térmica de cogeneración	$Pot_{term,cog}$	kW	516
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	444.181
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,9	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	408.633
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7.500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%q_{aprov}$	%	92,00
DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO				DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	20	Sólidos totales salida digestión (suma 3 digestores)	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	29.111
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	145,6
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	37.000	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	2.620
Precio energía eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,033
Distancia transporte de residuos	Dist	$km \cdot día^{-1}$	0	Energía eléctrica generada en cogeneración (S3D)	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	24.727
Coste transporte 1 (referido a kms)	$C_{trans,1}$	€/km <sup>-1</sup>	0,00	Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	12.273
Coste transporte 2 (referido a peso transportado)	$C_{trans,2}$	€/Tm <sup>-1</sup>	0,0	% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	66,83
Inversión estimada equipos pretratamiento	Inv	€	0	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/día <sup>-1</sup>	1.166
Periodo inversión	n	años	10,00	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,015
Interés inversión	i	_	0,10	Coste consumo eléctrico + gestión lodos	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	<b>0,048</b>
Precio compra/venta residuo	$C_{residuo}$	€/Tm	<b>35,8</b>	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/día <sup>-1</sup>	0

**Tabla A.1.8.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con levadura al 1%, del 3<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 3 (Cuarta parte).

	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,000
	Cuota amortización	$C_{amort}$	—	0,163
	Anualidad amortización	$C_{amort}$	€·año <sup>-1</sup>	0
	Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	0
	Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,0000
	Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	376
	Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,005
	<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	<b>0,053</b>
	<b>COSTE TOTAL cuando precio aditivo=0</b>	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	<b>0,048</b>

**Tabla A.1.9.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con levadura al 2%, del 3<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 4 (Primera parte).**

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	Q <sub>A</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	78.500	Carga orgánica aportada por lodo mixto	OLR <sub>1</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,72
Concentración de ST en lodo mixto	[ST] <sub>1</sub>	% (p/v)	4,1	Caudal aportado por lodo mixto	Q <sub>1</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	350
Concentración de SV en lodo mixto	[SV] <sub>1</sub>	% (p/v)	2,99	Carga orgánica aportada por levadura	OLR <sub>2</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0,28
Caudal másico de lodo mixto	M <sub>1</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	350.000	Caudal aportado por levadura	Q <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	7
Densidad de lodo mixto	ρ <sub>1</sub>	g/ml	1,0	Carga orgánica aportada por aditivo	OLR <sub>3</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de ST en levadura	[ST] <sub>2</sub>	% (p/v)	30,0	Caudal aportado por aditivo	Q <sub>3</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de SV en levadura	[SV] <sub>2</sub>	% (p/v)	24,5	Caudal total de lodo a digestión (1 solo digestor)	Q <sub>D</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	357
Caudal másico de levadura	M <sub>2</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	7.000	Carga orgánica total a digestión	OLR <sub>D</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	<b>2,00</b>
Densidad de levadura	ρ <sub>2</sub>	g/ml	1,0	Concentración de ST a digestión	[ST] <sub>D</sub>	% (p/v)	4,6
Concentración de ST en aditivo	[ST] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	[SV] <sub>D</sub>	% (p/v)	3,4
Concentración de SV en aditivo	[SV] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	% <sub>SV</sub>	%	74,20
Caudal másico de aditivo	M <sub>3</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	q <sub>n,D1</sub>	día	17,1
Densidad de aditivo	ρ <sub>3</sub>	g/ml	1				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	V <sub>D,útil</sub>	m <sup>3</sup>	6.100	Producción diaria de biogás	V <sub>gas</sub>	Nm <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	4.732
BMP Lodo mixto	BMP <sub>1</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SValim</sub> <sup>-1</sup>	0,21	Caudal de lodo salida digestor	Q <sub>SD</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	357
BMP Levadura	BMP <sub>2</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SValim</sub> <sup>-1</sup>	0,512	Concentración de ST en salida digestor	[ST] <sub>SD</sub>	% (p/v)	2,9
BMP Aditivo	BMP <sub>3</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SValim</sub> <sup>-1</sup>	0	Concentración de SV en salida digestor	[SV] <sub>SD</sub>	% (p/v)	1,7
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	%CH <sub>4</sub>	%	65	% Materia volátil en lodo digerido	% <sub>SSV</sub>	%	58,98
% Reducción de SV en digestión	%R <sub>SV</sub>	%	50	Sólidos volátiles eliminados en digestión	SV <sub>elim</sub>	kg <sub>SV</sub> ·día <sup>-1</sup>	6.090
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Calor específico del lodo	Ce <sub>lodo</sub>	kcal·m <sup>-3</sup> ·°C <sup>-1</sup>	1.000	Producción diaria de biogás a 35°C	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·día <sup>-1</sup>	4.732
Temperatura del lodo espesado	T <sub>F</sub>	°C	15	Producción horaria de biogás a 35°C	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	197

**Tabla A.1.9.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con levadura al 2%, del 3<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 4 (Segunda parte).

Temperatura de digestión	$T_D$	°C	35	Producción horaria de biogás (potencia)	$Pot_{V, gas}$	Kw	1145
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT \text{ caldera}}$	-	0,9	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	kcal·h <sup>-1</sup>	297.500
Temperatura lodo fresco entrada a inter. caldera	$T_{Fe}$	°C	35	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	kcal·h <sup>-1</sup>	36.770
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	$T_{Fs}$	°C	36	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	kcal·h <sup>-1</sup>	371.411
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{In}$	°C	35,38
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	m <sup>2</sup>	22,82
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	kcal·h <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ·°C <sup>-1</sup>	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	46,43
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	kcal·h <sup>-1</sup>	417.837
Poder calorífico del biogás (65% de CH <sub>4</sub> )	$PCI_{CH_4}$	kcal·m <sup>-3</sup>	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	87,39
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	109,77
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	44,32

**Tabla A.1.9.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con levadura al 2%, del 3<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 4 (Tercera parte).**

				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)			
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)				Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Definición	Símbolo	Unidades	Valores				
				Energía generada contenida en el biogás	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	10.027.011
Producción anual de biogás	$Pot_{V,gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	1.727.141	Potencia total generada en cogeneración	$Pot_{cog}$	kW	1.337
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$Pot_{elec,cog}$	kW	468
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia térmica de cogeneración	$Pot_{term,cog}$	kW	602
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	518.142
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,9	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	412.679
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7.500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%q_{aprov}$	%	79,65
DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO				DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	20	Sólidos totales salida digestión (suma 3 digestores)	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	30.975
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	154,9
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	37.000	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	2.788
Precio energía eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,036
Distancia transporte de residuos	Dist	$km \cdot día^{-1}$	0	Energía eléctrica generada en cogeneración (S3D)	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	28.845
Coste transporte 1 (referido a kms)	$C_{trans,1}$	€/km <sup>1</sup>	0,00	Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	8.155
Coste transporte 2 (referido a peso transportado)	$C_{trans,2}$	€/Tm <sup>1</sup>	0,0	% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	77,96
Inversión estimada equipos pretratamiento	Inv	€	0	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/día <sup>1</sup>	775
Periodo inversión	n	años	10,00	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,010
Interés inversión	i	_	0,10	Coste consumo eléctrico + gestión lodos	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	<b>0,045</b>
Precio compra/venta residuo	$C_{residuo}$	€/Tm	<b>28,6</b>	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/día <sup>1</sup>	0

**Tabla A.1.9.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con levadura al 2% del 3<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 4 (Cuarta parte).

	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,000
	Cuota amortización	$C_{amort}$	—	0,163
	Anualidad amortización	$C_{amort}$	€·año <sup>-1</sup>	0
	Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	0
	Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,0000
	Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	600
	Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,008
	<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	<b>0,053</b>
	<b>COSTE TOTAL cuando precio aditivo=0</b>	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	<b>0,045</b>

**Tabla A.1.10.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con MeOH 16gDQO/L, del 3<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 6 (Primera parte).**

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	Q <sub>A</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	78.500	Carga orgánica aportada por lodo mixto	OLR <sub>1</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,72
Concentración de ST en lodo mixto	[ST] <sub>1</sub>	% (p/v)	4,1	Caudal aportado por lodo mixto	Q <sub>1</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	350
Concentración de SV en lodo mixto	[SV] <sub>1</sub>	% (p/v)	2,99	Carga orgánica aportada por metanol	OLR <sub>2</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0,61
Caudal másico de lodo mixto	M <sub>1</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	350.000	Caudal aportado por metanol	Q <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	4,7
Densidad de lodo mixto	ρ <sub>1</sub>	g/ml	1,0	Carga orgánica aportada por aditivo	OLR <sub>3</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de ST en metanol	[ST] <sub>2</sub>	% (p/v)	100,0	Caudal aportado por aditivo	Q <sub>3</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de SV en metanol	[SV] <sub>2</sub>	% (p/v)	100,0	Caudal total de lodo a digestión (1 solo digestor)	Q <sub>D</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	354,7
Caudal másico de metanol	M <sub>2</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	3.733	Carga orgánica total a digestión	OLR <sub>D</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	<b>2,33</b>
Densidad de metanol	ρ <sub>2</sub>	g/ml	0,8	Concentración de ST a digestión	[ST] <sub>D</sub>	% (p/v)	5,1
Concentración de ST en aditivo	[ST] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	[SV] <sub>D</sub>	% (p/v)	4,0
Concentración de SV en aditivo	[SV] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	% <sub>SV</sub>	%	78,67
Caudal másico de aditivo	M <sub>3</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	q <sub>h,D1</sub>	día	17,2
Densidad de aditivo	ρ <sub>3</sub>	g/ml	1				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	V <sub>D,útil</sub>	m <sup>3</sup>	6.100	Producción diaria de biogás	V <sub>gas</sub>	Nm <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	6.890
BMP Lodo mixto	BMP <sub>1</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SV</sub> valim <sup>-1</sup>	0,21	Caudal de lodo salida digestor	Q <sub>SD</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	355
BMP Aditivo	BMP <sub>2</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SV</sub> valim <sup>-1</sup>	0,611	Concentración de ST en salida digestor	[ST] <sub>SD</sub>	% (p/v)	3,1
BMP Aditivo	BMP <sub>3</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SV</sub> valim <sup>-1</sup>	0	Concentración de SV en salida digestor	[SV] <sub>SD</sub>	% (p/v)	2,0
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	%CH <sub>4</sub>	%	65	% Materia volátil en lodo digerido	% <sub>SSV</sub>	%	64,84
% Reducción de SV en digestión	%R <sub>SV</sub>	%	50	Sólidos volátiles eliminados en digestión	SV <sub>elim</sub>	kg <sub>SV</sub> ·día <sup>-1</sup>	7.099
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Calor específico del lodo	Ce <sub>lodo</sub>	kcal·m <sup>-3</sup> ·°C <sup>-1</sup>	1.000	Producción diaria de biogás a 35°C	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·día <sup>-1</sup>	6.890

**Tabla A.1.10.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con MeOH 16gDQO/L, del 3<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 6 (Segunda parte).

Temperatura del lodo espesado	$T_F$	°C	15	Producción horaria de biogás a 35°C	$V_{gas}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	287
Temperatura de digestión	$T_D$	°C	35	Producción horaria de biogás (potencia)	$Pot_{V_{gas}}$	Kw	1.667
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT \text{ caldera}}$	-	0,9	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	$kcal \cdot h^{-1}$	295.604
Temperatura lodo fresco entrada a inter. Caldera	$T_{Fe}$	°C	35	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	36.535
Temperatura lodo fresco salida inter. Caldera	$T_{Fs}$	°C	36	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	369.044
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{In}$	°C	35,38
Temperatura agua salida inter. Caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	$m^2$	22,67
Coef. transf. calor material inter. Caldera	$U_T$	$kcal \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	$m^3 \cdot h^{-1}$	46,13
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	$kcal \cdot h^{-1}$	415.175
Poder calorífico del biogás (65% de CH <sub>4</sub> )	$PCI_{CH_4}$	$kcal \cdot m^{-3}$	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	86,83
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	200,25
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	30,25

**Tabla A.1.10.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con MeOH 16gDQO/L, del 3<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 6 (Tercera parte).**

				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)			
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)				Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Definición	Símbolo	Unidades	Valores				
				Energía generada contenida en el biogás	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	14.600.144
Producción anual de biogás	$Pot_{V,gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	2.514.857	Potencia total generada en cogeneración	$Pot_{cog}$	kW	1947
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$Pot_{elec,cog}$	kW	681
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia térmica de cogeneración	$Pot_{term,cog}$	kW	876
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	754.457
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,9	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	410.049
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7.500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%q_{aprov}$	%	54,35
DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO				DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	20	Sólidos totales salida digestión (suma 3 digestores)	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	32.847
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	164,2
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	37.000	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	2.956
Precio energía eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,038
Distancia transporte de residuos	Dist	$km \cdot día^{-1}$	0	Energía eléctrica generada en cogeneración (S3D)	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	42.000
Coste transporte 1 (referido a kms)	$C_{trans,1}$	€/km <sup>1</sup>	0,00	Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	0
Coste transporte 2 (referido a peso transportado)	$C_{trans,2}$	€/Tm <sup>1</sup>	0,0	% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	100,00
Inversión estimada equipos pretratamiento	Inv	€	0	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/día <sup>1</sup>	0
Periodo inversión	n	años	10,00	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,000
Interés inversión	i	-	0,10	Coste consumo eléctrico + gestión lodos	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	<b>0,038</b>
Precio compra/venta residuo	$C_{residuo}$	€/Tm	<b>107,5</b>	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/día <sup>1</sup>	0

**Tabla A.1.10.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con MeOH 16gDQO/L, del 3<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 6 (Cuarta parte).

	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,000
	Cuota amortización	$C_{amort}$	–	0,163
	Anualidad amortización	$C_{amort}$	€/año <sup>-1</sup>	0
	Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€/día <sup>-1</sup>	0
	Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,0000
	Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€/día <sup>-1</sup>	1204
	Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,015
	<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>-3</sup> <sub>agua trat.</sub>	<b>0,053</b>
	<b>COSTE TOTAL cuando precio aditivo=0</b>	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>-3</sup> <sub>agua trat.</sub>	<b>0,038</b>

**Tabla A.1.11.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con MeOH 12gDQO/L, del 3<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 7 (Primera parte).**

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	$Q_A$	$m^3 \cdot día^{-1}$	78.500	Carga orgánica aportada por lodo mixto	$OLR_1$	$kg_{sv} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	1,72
Concentración de ST en lodo mixto	$[ST]_1$	% (p/v)	4,1	Caudal aportado por lodo mixto	$Q_1$	$m^3 \cdot día^{-1}$	350
Concentración de SV en lodo mixto	$[SV]_1$	% (p/v)	2,99	Carga orgánica aportada por aditivo	$OLR_2$	$kg_{sv} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0,46
Caudal másico de lodo mixto	$M_1$	$kg \cdot día^{-1}$	350.000	Caudal aportado por aditivo	$Q_2$	$m^3 \cdot día^{-1}$	3,5
Densidad de lodo mixto	$\rho_1$	g/ml	1,0	Carga orgánica aportada por aditivo	$OLR_3$	$kg_{sv} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0
Concentración de ST en metanol	$[ST]_2$	% (p/v)	100,0	Caudal aportado por aditivo	$Q_3$	$m^3 \cdot día^{-1}$	0
Concentración de SV en metanol	$[SV]_2$	% (p/v)	100,0	Caudal total de lodo a digestión (1 solo digestor)	$Q_D$	$m^3 \cdot día^{-1}$	353,5
Caudal másico de metanol	$M_2$	$kg \cdot día^{-1}$	2.800	Carga orgánica total a digestión	$OLR_D$	$kg_{sv} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	<b>2,17</b>
Densidad de metanol	$\rho_2$	g/ml	0,8	Concentración de ST a digestión	$[ST]_D$	% (p/v)	4,8
Concentración de ST en aditivo	$[ST]_3$	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	$[SV]_D$	% (p/v)	3,8
Concentración de SV en aditivo	$[SV]_3$	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	$\%_{sv}$	%	77,51
Caudal másico de aditivo	$M_3$	$kg \cdot día^{-1}$	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	$q_{h,D1}$	día	17,3
Densidad de aditivo	$\rho_3$	g/ml	1				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	$V_{D,útil}$	$m^3$	6.100	Producción diaria de biogás	$V_{gas}$	$Nm^3 \cdot día^{-1}$	6.013
BMP Lodo mixto	$BMP_1$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SValim}^{-1}$	0,21	Caudal de lodo salida digestor	$Q_{SD}$	$m^3 \cdot día^{-1}$	354
BMP Metanol	$BMP_2$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SValim}^{-1}$	0,611	Concentración de ST en salida digestor	$[ST]_{SD}$	% (p/v)	3,0
BMP Aditivo	$BMP_3$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SValim}^{-1}$	0	Concentración de SV en salida digestor	$[SV]_{SD}$	% (p/v)	1,9
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	$\%_{CH_4}$	%	65	% Materia volátil en lodo digerido	$\%_{SSV}$	%	63,27
% Reducción de SV en digestión	$\%_{R_{SV}}$	%	50	Sólidos volátiles eliminados en digestión	$SV_{elim}$	$kg_{sv} \cdot día^{-1}$	6.633
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Calor específico del lodo	$Ce_{lodo}$	$kcal \cdot m^{-3} \cdot ^\circ C^{-1}$	1000	Producción diaria de biogás a 35°C	$V_{gas}$	$(Nm^3) \cdot día^{-1}$	6.013
Temperatura del lodo espesado	$T_F$	°C	15	Producción horaria de biogás a 35°C	$V_{gas}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	251

**Tabla A.1.11.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con MeOH 12gDQO/L, del 3<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 7 (Segunda parte).**

Temperatura de digestión	$T_D$	°C	35	Producción horaria de biogás (potencia)	$Pot_{V, gas}$	Kw	1455
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT \text{ caldera}}$	-	0,9	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	kcal·h <sup>-1</sup>	294.620
Temperatura lodo fresco entrada a inter. caldera	$T_{Fe}$	°C	35	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	kcal·h <sup>-1</sup>	36.414
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	$T_{Fs}$	°C	36	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	kcal·h <sup>-1</sup>	367.816
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{In}$	°C	35,38
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	m <sup>2</sup>	22,60
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	kcal·h <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ·°C <sup>-1</sup>	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	45,98
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	kcal·h <sup>-1</sup>	413.792
Poder calorífico del biogás (65% de CH <sub>4</sub> )	$PCI_{CH_4}$	kcal·m <sup>-3</sup>	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	86,54
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	164,00
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	34,54

**Tabla A.1.11.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con MeOH 12gDQO/L, del 3<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 7 (Tercera parte).**

				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)			
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)				Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Definición	Símbolo	Unidades	Valores				
				Energía generada contenida en el biogás	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	12.741.714
Producción anual de biogás	$Pot_{V,gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	2.194.745	Potencia total generada en cogeneración	$Pot_{cog}$	kW	1699
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$Pot_{elec,cog}$	kW	595
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia térmica de cogeneración	$Pot_{term,cog}$	kW	765
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	658.424
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,9	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	408.684
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7.500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%q_{aprov}$	%	62,07
DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO				DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	20	Sólidos totales salida digestión (suma 3 digestores)	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	31.448
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	157,2
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	37.000	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	2.830
Precio energía eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,036
Distancia transporte de residuos	Dist	$km \cdot día^{-1}$	0	Energía eléctrica generada en cogeneración (S3D)	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	36.654
Coste transporte 1 (referido a kms)	$C_{trans,1}$	€/km	0,00	Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	346
Coste transporte 2 (referido a peso transportado)	$C_{trans,2}$	€/Tm	0,0	% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	99,07
Inversión estimada equipos pretratamiento	Inv	€	0	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/día	33
Periodo inversión	n	años	10,00	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,000
Interés inversión	i	_	0,10	Coste consumo eléctrico + gestión lodos	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	<b>0,036</b>
Precio compra/venta residuo	$C_{residuo}$	€/Tm	<b>154,4</b>	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/día	0

**Tabla A.1.11.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con MeOH 12gDQO/L, del 3<sup>er</sup> bloque de ensayos – Comb. 7 (Cuarta parte).**

Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,000
Cuota amortización	$C_{amort}$	–	0,163
Anualidad amortización	$C_{amort}$	€·año <sup>-1</sup>	0
Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	0
Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,0000
Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	1297
Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,017
<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	<b>0,053</b>
<b>COSTE TOTAL cuando precio aditivo=0</b>	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	<b>0,036</b>

ANEXO 2: Simulaciones del proceso de digestión anaerobia en discontinuo con el uso de residuos como aditivos.



**Tabla A.2.1.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR A, con lodo mixto del 4º bloque de ensayos (Primera Parte).**

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado EDAR	$Q_A$	$m^3 \cdot día^{-1}$	8.000	Carga orgánica aportada por lodo mixto	$OLR_1$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0,84
Concentración de ST en lodo mixto	$[ST]_1$	% (p/v)	4,80	Caudal aportado por lodo mixto	$Q_1$	$m^3 \cdot día^{-1}$	150
Concentración de SV en lodo mixto	$[SV]_1$	% (p/v)	3,40	Carga orgánica aportada por aditivo	$OLR_2$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0
Caudal másico de lodo mixto	$M_1$	$kg \cdot día^{-1}$	150.000	Caudal aportado por aditivo	$Q_2$	$m^3 \cdot día^{-1}$	0
Densidad de lodo mixto	$\rho_1$	g/ml	1,00	Carga orgánica aportada por aditivo	$OLR_3$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0
Concentración de ST en aditivo	$[ST]_2$	% (p/v)	0	Caudal aportado por aditivo	$Q_3$	$m^3 \cdot día^{-1}$	0
Concentración de SV en aditivo	$[SV]_2$	% (p/v)	0	Caudal total de lodo a digestión	$Q_D$	$m^3 \cdot día^{-1}$	150
Caudal másico de aditivo	$M_2$	$kg \cdot día^{-1}$	0	Carga orgánica total a digestión	$OLR_D$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0,84
Densidad de aditivo	$\rho_2$	g/ml	0	Concentración de ST a digestión	$[ST]_D$	% (p/v)	4,80
Concentración de ST en aditivo	$[ST]_3$	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	$[SV]_D$	% (p/v)	3,40
Concentración de SV en aditivo	$[SV]_3$	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	$\%_{SV}$	%	70,83
Caudal másico de aditivo	$M_3$	$kg \cdot día^{-1}$	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	$q_{h,D1}$	día	40,50
Densidad de aditivo	$\rho_3$	g/ml	0				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	$V_{D,útil}$	$m^3$	6.080	Producción diaria de biogás	$V_{gas}$	$Nm^3 \cdot día^{-1}$	1.648
BMP Lodo mixto (valor teórico lodo mixto)	$BMP_1$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SV_{alim}}^{-1}$	0,21	Caudal de lodo salida digestor	$Q_{SD}$	$m^3 \cdot día^{-1}$	150
BMP Aditivo	$BMP_2$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SV_{alim}}^{-1}$	0	Concentración de ST en salida digestor	$[ST]_{SD}$	% (p/v)	3,10
BMP Aditivo	$BMP_3$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SV_{alim}}^{-1}$	0	Concentración de SV en salida digestor	$[SV]_{SD}$	% (p/v)	1,70
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	$\%CH_4$	%	65	% Materia volátil en lodo digerido	$\%_{SSV}$	%	54,84
% Reducción de SV en digestión	$\%R_{SV}$	%	50	Sólidos volátiles eliminados en digestión	$SV_{elim}$	$kg_{SV} \cdot día^{-1}$	2.550
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Calor específico del lodo	$Ce_{lodo}$	$kcal \cdot m^{-3} \cdot ^\circ C^{-1}$	1.000	Producción diaria de biogás a 35°C	$V_{gas}$	$(Nm^3) \cdot día^{-1}$	1.648

**Tabla A.2.1.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR A, con lodo mixto del 4º bloque de ensayos (Segunda Parte).

Temperatura del lodo espesado	$T_F$	°C	15	Producción horaria de biogás a 35°C	$V_{gas}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	69
Temperatura de digestión	$T_D$	°C	35	Producción horaria de biogás (potencia)	$Pot_{V_{gas}}$	Kw	399
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT \text{ caldera}}$	-	0,90	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	$kcal \cdot h^{-1}$	125.000
Temperatura lodo fresco entrada a inter. caldera	$T_{Fe}$	°C	35	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	15.449
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	$T_{Fs}$	°C	36	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	156.055
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{In}$	°C	35,38
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	$m^2$	9,59
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	$kcal \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	$m^3 \cdot h^{-1}$	19,51
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	$kcal \cdot h^{-1}$	175.562
Poder calorífico del biogás (65% de $CH_4$ )	$PCI_{CH_4}$	$kcal \cdot m^{-3}$	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	36,72
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	31,94
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	53,48

**Tabla A.2.1.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR A, con lodo mixto del 4º bloque de ensayos (Tercera Parte).**

				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)			
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)				Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Definición	Símbolo	Unidades	Valores				
				Energía generada contenida en el biogás	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	3.491.506
Producción anual de biogás	$Pot_{V,gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	601.408	Potencia total generada en cogeneración	$Pot_{cog}$	kW	466
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$Pot_{elec,cog}$	kW	163
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia térmica de cogeneración	$Pot_{term,cog}$	kW	209
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	180.422
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,90	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	173.394
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7.500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%q_{aprov}$	%	96,10
DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)				DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	20	Sólidos totales salida digestión	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	4.650
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	23,30
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	6.400	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	419
Precio e. eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	$€/m^3_{agua\ trat.}$	0,052
				Energía eléctrica generada en cogeneración	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	3.348
				Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	3.052
				% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	52,31
				Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/día	290
				Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	$€/m^3_{agua\ trat.}$	0,036
				Coste total (consumo eléctrico + gestión lodos)	$C_{TOTAL}$	$€/m^3_{agua\ trat.}$	<b>0,089</b>



**Tabla A.2.2.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR A con residuo de matadero ( $L_{dig}$ :Aditivo - 2:0,5), del 4º bloque de ensayos – Comb. 2 (Primera parte).

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	$Q_A$	$m^3 \cdot día^{-1}$	8.000	Carga orgánica aportada por lodo mixto	$OLR_1$	$kg_{sv} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0,84
Concentración de ST en lodo mixto	$[ST]_1$	% (p/v)	4,80	Caudal aportado por lodo mixto	$Q_1$	$m^3 \cdot día^{-1}$	150
Concentración de SV en lodo mixto	$[SV]_1$	% (p/v)	3,40	Carga orgánica aportada por residuo de matadero	$OLR_2$	$kg_{sv} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0,30
Caudal másico de lodo mixto	$M_1$	$kg \cdot día^{-1}$	150.000	Caudal aportado por residuo de matadero	$Q_2$	$m^3 \cdot día^{-1}$	6,10
Densidad de lodo mixto	$\rho_1$	g/ml	1,0	Carga orgánica aportada por aditivo	$OLR_3$	$kg_{sv} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0
Concentración de ST en residuo de matadero	$[ST]_2$	% (p/v)	26,90	Caudal aportado por aditivo	$Q_3$	$m^3 \cdot día^{-1}$	0
Concentración de SV en residuo de matadero	$[SV]_2$	% (p/v)	23,30	Caudal total de lodo a digestión	$Q_D$	$m^3 \cdot día^{-1}$	156,10
Caudal másico de residuo de matadero	$M_2$	$kg \cdot día^{-1}$	7.900	Carga orgánica total a digestión	$OLR_D$	$kg_{sv} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	1,14
Densidad de residuo de matadero	$\rho_2$	g/ml	1,30	Concentración de ST a digestión	$[ST]_D$	% (p/v)	6,00
Concentración de ST en aditivo	$[ST]_3$	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	$[SV]_D$	% (p/v)	4,40
Concentración de SV en aditivo	$[SV]_3$	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	$\%_{SV}$	%	74,43
Caudal másico de aditivo	$M_3$	$kg \cdot día^{-1}$	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	$q_{h,D1}$	día	39,00
Densidad de aditivo	$\rho_3$	g/ml	0				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digester	$V_{D,útil}$	$m^3$	6.080	Producción diaria de biogás	$V_{gas}$	$Nm^3 \cdot día^{-1}$	3.149
BMP Lodo mixto (valor teórico lodo mixto)	$BMP_1$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SValim}^{-1}$	0,21	Caudal de lodo salida digester	$Q_{SD}$	$m^3 \cdot día^{-1}$	156
BMP residuo de matadero	$BMP_2$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SValim}^{-1}$	0,53	Concentración de ST en salida digester	$[ST]_{SD}$	% (p/v)	3,80
BMP Aditivo	$BMP_3$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SValim}^{-1}$	0	Concentración de SV en salida digester	$[SV]_{SD}$	% (p/v)	2,20
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	$\%CH_4$	%	65	% Materia volátil en lodo digerido	$\%_{SSV}$	%	59,27
% Reducción de SV en digestión	$\%R_{SV}$	%	50	Sólidos volátiles eliminados en digestión	$SV_{elim}$	$kg_{sv} \cdot día^{-1}$	3.470
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores

**Tabla A.2.2.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR A con residuo de matadero ( $L_{\text{dig}}:\text{Aditivo} = 2:0,5$ ), del 4º bloque de ensayos – Comb. 2 (Segunda parte).

Calor específico del lodo	$C_{e \text{ lodo}}$	$\text{kcal}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{°C}^{-1}$	1.000	Producción diaria de biogás a 35°C	$V_{\text{gas}}$	$(\text{Nm}^3)\cdot\text{día}^{-1}$	3.149
Temperatura del lodo espesado	$T_F$	°C	15	Producción horaria de biogás a 35°C	$V_{\text{gas}}$	$(\text{Nm}^3)\cdot\text{h}^{-1}$	131
Temperatura de digestión	$T_D$	°C	35	Producción horaria de biogás (potencia)	$\text{Pot}_{V,\text{gas}}$	Kw	762
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{\text{INT caldera}}$	-	0,9	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	$\text{kcal}\cdot\text{h}^{-1}$	130.064
Temperatura lodo fresco entrada a inter. caldera	$T_{Fe}$	°C	35	Pérdidas de calor	$q_{\text{INT}}$	$\text{kcal}\cdot\text{h}^{-1}$	16.075
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	$T_{Fs}$	°C	36	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{\text{INT}}$	$\text{kcal}\cdot\text{h}^{-1}$	162.377
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{\text{ln}}$	°C	35,38
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{\text{INT}}$	$\text{m}^2$	9,98
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	$\text{kcal}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	$\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	20,30
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{\text{CAL}}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{\text{CAL}}$	$\text{kcal}\cdot\text{h}^{-1}$	182.674
Poder calorífico del biogás (65% de $\text{CH}_4$ )	$\text{PCI}_{\text{CH}_4}$	$\text{kcal}\cdot\text{m}^{-3}$	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{\text{gas, cal}}$	$(\text{Nm}^3)\cdot\text{h}^{-1}$	38,21
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{\text{CH}_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{\text{gas, exd}}$	$(\text{Nm}^3)\cdot\text{h}^{-1}$	92,98
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{\text{gas}}$	%	29,12

**Tabla A.2.2.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR A con residuo de matadero ( $L_{dig}$ :Aditivo - 2:0,5), del 4º bloque de ensayos – Comb. 2 (Tercera parte).

CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)							
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)				Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Definición	Símbolo	Unidades	Valores				
				Energía generada contenida en el biogás	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	6.671.909
Producción anual de biogás	$Pot_{V,gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	1.149.228	Potencia total generada en cogeneración	$Pot_{cog}$	kW	890
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$Pot_{elec,cog}$	kW	311
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia térmica de cogeneración	$Pot_{term,cog}$	kW	400
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	344.768
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,90	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	180.419
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7.500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%q_{aprov}$	%	52,33
DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO				DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	20	Sólidos totales salida digestión	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	5.855
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	29,30
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	6.400	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	527
Precio energía eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,066
Distancia transporte de residuos	$Dist$	$km \cdot día^{-1}$	80	Energía eléctrica generada en cogeneración	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	6.398
Coste transporte 1 (referido a kms)	$C_{trans,1}$	€·km <sup>-1</sup>	1,50	Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	2,279
Coste transporte 2 (referido a peso transportado)	$C_{trans,2}$	€·Tm <sup>-1</sup>	10,00	% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	99,96
Inversión estimada equipos pretratamiento	$Inv$	€	100.000	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€·día <sup>-1</sup>	0,217
Periodo inversión	$n$	Años	10,00	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€·m <sup>3</sup> agua trat.	0,000
Interés inversión	$i$	—	0,10	Coste consumo eléctrico + gestión lodos	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>3</sup> agua trat.	<b>0,066</b>
Precio compra/venta residuo para Beneficio = 0	$C_{residuo}$	€/Tm	<b>6,31</b>	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	89
Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.					0,011
Cuota amortización	$C_{amort}$	—					0,163

**Tabla A.2.2.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR A con residuo de matadero ( $L_{dig}:Aditivo - 2:0,5$ ), del 4º bloque de ensayos – Comb. 2 (Cuarta parte).

Anualidad amortización	$C_{amort}$	€·año <sup>-1</sup>	16.275
Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	45
Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,006
Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	50
Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,006
<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	<b>0,089</b>
<b>COSTE TOTAL COMPRA/VENTA RESIDUO = 0€</b>	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	<b>0,083</b>

**Tabla A.2.3.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR A con lixiviado ( $L_{\text{dig}}:\text{Aditivo} = 2:0,1$ ) del 4º bloque de ensayos – Comb. 3 (Primera parte).

Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	$Q_A$	$\text{m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$	8.000	Carga orgánica aportada por lodo mixto	$OLR_1$	$\text{kg}_{\text{SV}} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{día}^{-1}$	0,84
Concentración de ST en lodo mixto	$[ST]_1$	% (p/v)	4,80	Caudal aportado por lodo mixto	$Q_1$	$\text{m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$	150
Concentración de SV en lodo mixto	$[SV]_1$	% (p/v)	3,40	Carga orgánica aportada por lixiviado	$OLR_2$	$\text{kg}_{\text{SV}} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{día}^{-1}$	0,0084
Caudal másico de lodo mixto	$M_1$	$\text{kg} \cdot \text{día}^{-1}$	150.000	Caudal aportado por lixiviado	$Q_2$	$\text{m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$	6,6
Densidad de lodo mixto	$\rho_1$	g/ml	1,00	Carga orgánica aportada por aditivo	$OLR_3$	$\text{kg}_{\text{SV}} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{día}^{-1}$	0
Concentración de ST en lixiviado	$[ST]_2$	% (p/v)	3,10	Caudal aportado por aditivo	$Q_3$	$\text{m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$	0
Concentración de SV en lixiviado	$[SV]_2$	% (p/v)	0,80	Caudal total de lodo a digestión	$Q_D$	$\text{m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$	156,60
Caudal másico de lixiviado	$M_2$	$\text{kg} \cdot \text{día}^{-1}$	6.625	Carga orgánica total a digestión	$OLR_D$	$\text{kg}_{\text{SV}} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{día}^{-1}$	0,85
Densidad de lixiviado	$\rho_2$	g/ml	1,0	Concentración de ST a digestión	$[ST]_D$	% (p/v)	4,80
Concentración de ST en aditivo	$[ST]_3$	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	$[SV]_D$	% (p/v)	3,30
Concentración de SV en aditivo	$[SV]_3$	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	$\%_{\text{SV}}$	%	69,57
Caudal másico de aditivo	$M_3$	$\text{kg} \cdot \text{día}^{-1}$	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	$q_{h,D1}$	día	38,80
Densidad de aditivo	$\rho_3$	g/ml	0				
<b>PROCESO DE DIGESTIÓN</b>				<b>PROCESO DE DIGESTIÓN</b>			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	$V_{D,\text{útil}}$	$\text{m}^3$	6.080	Producción diaria de biogás	$V_{\text{gas}}$	$\text{Nm}^3 \cdot \text{día}^{-1}$	1.648
BMP Lodo mixto (valor teórico lodo mixto)	$BMP_1$	$\text{Nm}^3_{\text{CH}_4} \cdot \text{kg}_{\text{SVvalim}}^{-1}$	0,21	Caudal de lodo salida digestor	$Q_{SD}$	$\text{m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$	155
BMP Lixiviado	$BMP_2$	$\text{Nm}^3_{\text{CH}_4} \cdot \text{kg}_{\text{SVvalim}}^{-1}$	0	Concentración de ST en salida digestor	$[ST]_{SD}$	% (p/v)	3,10
BMP Aditivo	$BMP_3$	$\text{Nm}^3_{\text{CH}_4} \cdot \text{kg}_{\text{SVvalim}}^{-1}$	0	Concentración de SV en salida digestor	$[SV]_{SD}$	% (p/v)	1,70
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	$\%_{\text{CH}_4}$	%	65	% Materia volátil en lodo digerido	$\%_{\text{SSV}}$	%	53,34
% Reducción de SV en digestión	$\%_{\text{RSV}}$	%	50	Sólidos volátiles eliminados en digestión	$SV_{\text{elim}}$	$\text{kg}_{\text{SV}} \cdot \text{día}^{-1}$	2.576
<b>SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)</b>				<b>CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)</b>			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Calor específico del lodo	$C_{e \text{ lodo}}$	$\text{kcal} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	1.000	Producción diaria de biogás a 35°C	$V_{\text{gas}}$	$(\text{Nm}^3) \cdot \text{día}^{-1}$	1.648
Temperatura del lodo espesado	$T_F$	°C	15	Producción horaria de biogás a 35°C	$V_{\text{gas}}$	$(\text{Nm}^3) \cdot \text{h}^{-1}$	69
Temperatura de digestión	$T_D$	°C	35	Producción horaria de biogás (potencia)	$P_{\text{otv,gas}}$	Kw	399

**Tabla A.2.3.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR A con lixiviado ( $L_{dig}:Aditivo = 2:0,1$ ), del 4º bloque de ensayos – Comb. 3 (Segunda parte).**

Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT\ caldera}$	-	0,90	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	$kcal \cdot h^{-1}$	130.521
Temperatura lodo fresco entrada a inter. caldera	$T_{Fe}$	°C	35	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	16.132
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	$T_{Fs}$	°C	36	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	162.947
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{In}$	°C	35,38
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	$m^2$	9,91
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	$kcal \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	$m^3 \cdot h^{-1}$	20,17
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	$kcal \cdot h^{-1}$	183.316
Poder calorífico del biogás (65% de $CH_4$ )	$PCI_{CH_4}$	$kcal \cdot m^{-3}$	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	38,34
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	30,31
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	55,85

246

				<b>CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)</b>			
<b>SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)</b>				<b>Definición</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>
<b>Definición</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>				
				Energía generada contenida en el biogás	$E_{elec, cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	3.491.506
Producción anual de biogás	$Pot_{V, gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	601.408	Potencia total generada en cogeneración	$Pot_{cog}$	kW	466
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$Pot_{elec, cog}$	kW	163
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia térmica de cogeneración	$Pot_{term, cog}$	kW	209
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	180.422
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT, cog}$	-	0,9	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	181.053
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7.500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%_{q, aprov}$	%	100,35
<b>DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO</b>				<b>DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)</b>			
<b>Definición</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>	<b>Definición</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l, des}$	%	20	Sólidos totales salida digestión	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	4.829
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest, lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	24,1
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec, bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	6.400	Coste gestión lodos	$C_{gest, lodo}$	€/día	435

**Tabla A.2.3.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR A con lixiviado ( $L_{dig}:Aditivo - 2:0,1$ ), del 4ª bloque de ensayos – Comb. 3 (Tercera parte).

Precio energía eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,054
Distancia transporte de residuos	Dist	km·día <sup>-1</sup>	0	Energía eléctrica generada en cogeneración (S3D)	$E_{elec,cog}$	kWh·día <sup>-1</sup>	3.348
Coste transporte 1 (referido a kms)	$C_{trans,1}$	€·km <sup>-1</sup>	0,00	Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	kWh·día <sup>-1</sup>	3.051,981
Coste transporte 2 (referido a peso transportado)	$C_{trans,2}$	€·Tm <sup>-1</sup>	0,0	% Autoconsumo	%AC <sub>elec</sub>	%	52,31
Inversión estimada equipos pretratamiento	Inv	€	0	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€·día <sup>-1</sup>	290
Periodo inversión	n	años	10,00	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	0,036
Interés inversión	i	–	0,10	Coste consumo eléctrico + gestión lodos	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	<b>0,091</b>
Precio compra/venta residuo	$C_{residuo}$	€/Tm	<b>-1,29</b>	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	0
				Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,000
				Cuota amortización	$C_{amort}$	–	0,163
				Anualidad amortización	$C_{amort}$	€·año <sup>-1</sup>	0
				Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	0
				Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,000
				Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	-9
				Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	-0,001
				<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	<b>0,089</b>
				<b>COSTE TOTAL COMPRA/VENTA RESIDUO=0 €</b>	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	<b>0,091</b>



**Tabla A.2.4.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR A con deyecciones ganaderas ( $L_{dig}$ :Aditivo - 2:0,5), del 4º bloque de ensayos – Comb. 4 (Primera parte).

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	$Q_A$	$m^3 \cdot día^{-1}$	8.000	Carga orgánica aportada por lodo mixto	$OLR_1$	$kg_{sv} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0,84
Concentración de ST en lodo mixto	$[ST]_1$	% (p/v)	4,80	Caudal aportado por lodo mixto	$Q_1$	$m^3 \cdot día^{-1}$	150
Concentración de SV en lodo mixto	$[SV]_1$	% (p/v)	3,40	Carga orgánica aportada por deyecciones ganaderas	$OLR_2$	$kg_{sv} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0,19
Caudal másico de lodo mixto	$M_1$	$kg \cdot día^{-1}$	150.000	Caudal aportado por deyecciones ganaderas	$Q_2$	$m^3 \cdot día^{-1}$	154,0
Densidad de lodo mixto	$\rho_1$	g/ml	1,00	Carga orgánica aportada por aditivo	$OLR_3$	$kg_{sv} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0
Concentración de ST en deyecciones ganaderas	$[ST]_2$	% (p/v)	1,50	Caudal aportado por aditivo	$Q_3$	$m^3 \cdot día^{-1}$	0
Concentración de SV en deyecciones ganaderas	$[SV]_2$	% (p/v)	0,70	Caudal total de lodo a digestión	$Q_D$	$m^3 \cdot día^{-1}$	304,0
Caudal másico de deyecciones ganaderas	$M_2$	$kg \cdot día^{-1}$	154.000	Carga orgánica total a digestión	$OLR_D$	$kg_{sv} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	1,03
Densidad de deyecciones ganaderas	$\rho_2$	g/ml	1,0	Concentración de ST a digestión	$[ST]_D$	% (p/v)	3,10
Concentración de ST en aditivo	$[ST]_3$	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	$[SV]_D$	% (p/v)	2,10
Concentración de SV en aditivo	$[SV]_3$	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	$\%_{SV}$	%	65,82
Caudal másico de aditivo	$M_3$	$kg \cdot día^{-1}$	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	$q_{h,D1}$	día	20,00
Densidad de aditivo	$\rho_3$	g/ml	0				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	$V_{D,útil}$	$m^3$	6.080	Producción diaria de biogás	$V_{gas}$	$Nm^3 \cdot día^{-1}$	2.156
BMP Lodo mixto (valor teórico lodo mixto)	$BMP_1$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{Svalim}^{-1}$	0,21	Caudal de lodo salida digestor	$Q_{SD}$	$m^3 \cdot día^{-1}$	304
BMP Deyecciones ganaderas	$BMP_2$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{Svalim}^{-1}$	0,29	Concentración de ST en salida digestor	$[ST]_{SD}$	% (p/v)	2,10
BMP Aditivo	$BMP_3$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{Svalim}^{-1}$	0	Concentración de SV en salida digestor	$[SV]_{SD}$	% (p/v)	1,00
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	$\%CH_4$	%	65	% Materia volátil en lodo digerido	$\%_{SSV}$	%	49,06
% Reducción de SV en digestión	$\%R_{SV}$	%	50	Sólidos volátiles eliminados en digestión	$SV_{elim}$	$kg_{sv} \cdot día^{-1}$	3.120
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Calor específico del lodo	$Ce_{lodo}$	$kcal \cdot m^{-3} \cdot ^\circ C^{-1}$	1.000	Producción diaria de biogás a 35°C	$V_{gas}$	$(Nm^3) \cdot día^{-1}$	2.156

**Tabla A.2.4.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR A con deyecciones ganaderas ( $L_{dig}:Aditivo - 2:0,5$ ), del 4º bloque de ensayos – Comb. 4 (Segunda parte).

Temperatura del lodo espesado	$T_F$	°C	15	Producción horaria de biogás a 35°C	$V_{gas}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	90
Temperatura de digestión	$T_D$	°C	35	Producción horaria de biogás (potencia)	$Pot_{V,gas}$	Kw	522
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT \text{ caldera}}$	-	0,90	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	$kcal \cdot h^{-1}$	253.333
Temperatura lodo fresco entrada a inter. caldera	$T_{Fe}$	°C	35	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	31.311
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	$T_{Fs}$	°C	36	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	316.271
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{ln}$	°C	35,38
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	$m^2$	19,43
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	$kcal \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	$m^3 \cdot h^{-1}$	39,53
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	$kcal \cdot h^{-1}$	355.805
Poder calorífico del biogás (65% de $CH_4$ )	$PCI_{CH_4}$	$kcal \cdot m^{-3}$	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	74,42
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	15,42
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	82,83

**Tabla A.2.4.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR A con deyecciones ganaderas ( $L_{dig}:Aditivo - 2:0,5$ ), del 4º bloque de ensayos – Comb. 4 (Tercera parte).

SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)			
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)				Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Producción anual de biogás	$Pot_{V,gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	786.987	Energía generada contenida en el biogás	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	4.568.898
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia total generada en cogeneración	$Pot_{cog}$	kW	609
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$Pot_{elec,cog}$	kW	213
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Potencia térmica de cogeneración	$Pot_{term,cog}$	kW	274
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,90	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	236.096
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7.500	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	351.413
DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO				DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	20	Sólidos totales salida digestión	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	6.359
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	31,80
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	6.400	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	572
Precio energía eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,072
Distancia transporte de residuos	$Dist$	$km \cdot día^{-1}$	40	Energía eléctrica generada en cogeneración	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	4.381
Coste transporte 1 (referido a kms)	$C_{trans,1}$	€·km <sup>-1</sup>	1,50	Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	2.019
Coste transporte 2 (referido a peso transportado)	$C_{trans,2}$	€·Tm <sup>-1</sup>	10,0	% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	68,46
Inversión estimada equipos pretratamiento	$Inv$	€	0	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€·día <sup>-1</sup>	192
Periodo inversión	$n$	años	10,00	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	0,024
Interés inversión	$i$	—	0,10	Coste consumo eléctrico + gestión lodos	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	<b>0,096</b>
Precio compra/venta residuo	$C_{residuo}$	€/Tm	<b>-7,94</b>	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	1.170

**Tabla A.2.4.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR A con deyecciones ganaderas ( $L_{dig}:Aditivo - 2:0,5$ ), del 4º bloque de ensayos – Comb. 4 (Cuarta parte).

	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,146
	Cuota amortización	$C_{amort}$	–	0,163
	Anualidad amortización	$C_{amort}$	€·año <sup>-1</sup>	0
	Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	0
	Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,000
	Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	-1222
	Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	-0,153
	<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	<b>0,089</b>
	<b>COSTE TOTAL COMPRA/VENTA RESIDUO = 0€</b>	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	<b>0,242</b>

**Tabla A.2.5.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con lodo mixto, del 5º bloque de ensayos (Primera parte).**

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	Q <sub>A</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	25.852	Carga orgánica aportada por lodo mixto	OLR <sub>1</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,29
Concentración de ST en lodo mixto	[ST] <sub>1</sub>	% (p/v)	4,00	Caudal aportado por lodo mixto	Q <sub>1</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	150
Concentración de SV en lodo mixto	[SV] <sub>1</sub>	% (p/v)	3,00	Carga orgánica aportada por aditivo	OLR <sub>2</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Caudal másico de lodo mixto	M <sub>1</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	150.000	Caudal aportado por aditivo	Q <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Densidad de lodo mixto	ρ <sub>1</sub>	g/ml	1,00	Carga orgánica aportada por aditivo	OLR <sub>3</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de ST en aditivo	[ST] <sub>2</sub>	% (p/v)	0	Caudal aportado por aditivo	Q <sub>3</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de SV en aditivo	[SV] <sub>2</sub>	% (p/v)	0	Caudal total de lodo a digestión (1 solo digestor)	Q <sub>D</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	150
Caudal másico de aditivo	M <sub>2</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	0	Carga orgánica total a digestión	OLR <sub>D</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,29
Densidad de aditivo	ρ <sub>2</sub>	g/ml	1,00	Concentración de ST a digestión	[ST] <sub>D</sub>	% (p/v)	4,00
Concentración de ST en aditivo	[ST] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	[SV] <sub>D</sub>	% (p/v)	3,00
Concentración de SV en aditivo	[SV] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	% <sub>SV</sub>	%	75,00
Caudal másico de aditivo	M <sub>3</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	q <sub>n,D1</sub>	día	23,31
Densidad de aditivo	ρ <sub>3</sub>	g/ml	0				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	V <sub>D,útil</sub>	m <sup>3</sup>	3.497	Producción diaria de biogás	V <sub>gas</sub>	Nm <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1.454
BMP Lodo mixto (valor teórico lodo mixto)	BMP <sub>1</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SV</sub> valim <sup>-1</sup>	0,21	Caudal de lodo salida digestor	Q <sub>SD</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	150
BMP Aditivo	BMP <sub>2</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SV</sub> valim <sup>-1</sup>	0	Concentración de ST en salida digestor	[ST] <sub>SD</sub>	% (p/v)	2,90
BMP Aditivo	BMP <sub>3</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SV</sub> valim <sup>-1</sup>	0	Concentración de SV en salida digestor	[SV] <sub>SD</sub>	% (p/v)	1,90
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	%CH <sub>4</sub>	%	65	% Materia volátil en lodo digerido	% <sub>SSV</sub>	%	65,75
% Reducción de SV en digestión	%R <sub>SV</sub>	%	36	Sólidos volátiles eliminados en digestión	SV <sub>elim</sub>	kg <sub>SV</sub> ·día <sup>-1</sup>	1.620
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Calor específico del lodo	Ce <sub>lodo</sub>	kcal·m <sup>-3</sup> ·°C <sup>-1</sup>	1.000	Producción diaria de biogás	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·día <sup>-1</sup>	1.454
Temperatura del lodo espesado	T <sub>F</sub>	°C	15	Producción horaria de biogás	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	61

**Tabla A.2.5.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con lodo mixto, del 5º bloque de ensayos (Segunda parte).**

Temperatura de digestión	$T_D$	°C	33	Producción horaria de biogás (potencia)	$Pot_{v, gas}$	Kw	352
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT \text{ caldera}}$	-	0,90	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	$kcal \cdot h^{-1}$	112.500
Temperatura lodo fresco entrada a inter. caldera	$T_{Fe}$	°C	33	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	13.904
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	$T_{Fs}$	°C	34	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	140.449
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{In}$	°C	37,39
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	$m^2$	8,17
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	$kcal \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	$m^3 \cdot h^{-1}$	17,56
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	$kcal \cdot h^{-1}$	158.006
Poder calorífico del biogás (65% de $CH_4$ )	$PCI_{CH_4}$	$kcal \cdot m^{-3}$	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	33,05
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	27,53
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	54,55

**Tabla A.2.5.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con lodo mixto, del 5º bloque de ensayos (Tercera parte).**

SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)		CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)				Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores		
				Energía generada contenida en el biogás	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	3.080.740		
Producción anual de biogás	$Pot_{V, gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	530.654	Potencia total generada en cogeneración	$Pot_{cog}$	kW	411		
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$Pot_{elec,cog}$	kW	144		
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia térmica de cogeneración	$Pot_{term,cog}$	kW	185		
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	159.196		
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,90	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	156.055		
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7.500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%q_{aprov}$	%	98,03		
DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)		DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)							
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores		
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	25	Sólidos totales salida digestión (suma 2 digestores)	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	8.760		
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	39,80		
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	11.400	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	717		
Precio energía eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,028		
Energía eléctrica generada en cogeneración	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	5.908						
Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	5.492						
% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	51,83						
Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/día <sup>-1</sup>	522						
<b>Coste consumo eléctrico</b>	$C_{cons,elec}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,020						
<b>Coste total (consumo eléctrico + gestión lodos)</b>	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	<b>0,048</b>						



**Tabla A.2.6.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con residuo de matadero ( $L_{dig}$ :Aditivo - 2:0,5), del 5º bloque de ensayos – Comb. 2 (Primera parte).

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	$Q_A$	$m^3 \cdot día^{-1}$	25.852	Carga orgánica aportada por lodo mixto	$OLR_1$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	1,29
Concentración de ST en lodo mixto	$[ST]_1$	% (p/v)	4,00	Caudal aportado por lodo mixto	$Q_1$	$m^3 \cdot día^{-1}$	150
Concentración de SV en lodo mixto	$[SV]_1$	% (p/v)	3,00	Carga orgánica aportada por residuo de matadero	$OLR_2$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0,30
Caudal másico de lodo mixto	$M_1$	$kg \cdot día^{-1}$	150.000	Caudal aportado por residuo de matadero	$Q_2$	$m^3 \cdot día^{-1}$	3,50
Densidad de lodo mixto	$\rho_1$	g/ml	1,00	Carga orgánica aportada por aditivo	$OLR_3$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0
Concentración de ST en residuo de matadero	$[ST]_2$	% (p/v)	27,0	Caudal aportado por aditivo	$Q_3$	$m^3 \cdot día^{-1}$	0
Concentración de SV en residuo de matadero	$[SV]_2$	% (p/v)	23,2	Caudal total de lodo a digestión (1 solo digestor)	$Q_D$	$m^3 \cdot día^{-1}$	153,5
Caudal másico de residuo de matadero	$M_2$	$kg \cdot día^{-1}$	4.488	Carga orgánica total a digestión	$OLR_D$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	1,58
Densidad de residuo de matadero	$\rho_2$	g/ml	1,30	Concentración de ST a digestión	$[ST]_D$	% (p/v)	4,70
Concentración de ST en aditivo	$[ST]_3$	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	$[SV]_D$	% (p/v)	3,60
Concentración de SV en aditivo	$[SV]_3$	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	$\%_{SV}$	%	76,84
Caudal másico de aditivo	$M_3$	$kg \cdot día^{-1}$	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	$q_{h,D1}$	día	22,80
Densidad de aditivo	$\rho_3$	g/ml	1,00				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	$V_{D,util}$	$m^3$	3.497	Producción diaria de biogás	$V_{gas}$	$Nm^3 \cdot día^{-1}$	2.196
BMP Lodo mixto (valor teórico lodo mixto)	$BMP_1$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SV_{alim}}^{-1}$	0,21	Caudal de lodo salida digestor	$Q_{SD}$	$m^3 \cdot día^{-1}$	153
BMP Residuo de matadero	$BMP_2$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SV_{alim}}^{-1}$	0,463	Concentración de ST en salida digestor	$[ST]_{SD}$	% (p/v)	3,30
BMP Aditivo	$BMP_3$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SV_{alim}}^{-1}$	0	Concentración de SV en salida digestor	$[SV]_{SD}$	% (p/v)	2,2
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	$\%CH_4$	%	65	% Materia volátil en lodo digerido	$\%_{SSV}$	%	66,57
% Reducción de SV en digestión	$\%R_{SV}$	%	40	Sólidos volátiles eliminados en digestión	$SV_{elim}$	$kg_{SV} \cdot día^{-1}$	2.217
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Calor específico del lodo	$Ce_{lodo}$	$kcal \cdot m^{-3} \cdot ^\circ C^{-1}$	1.000	Producción diaria de biogás a	$V_{gas}$	$(Nm^3) \cdot día^{-1}$	2.196
Temperatura del lodo espesado	$T_F$	$^\circ C$	15	Producción horaria de biogás	$V_{gas}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	91

**Tabla A.2.6.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con residuo de matadero ( $L_{dig}$ :Aditivo - 2:0,5), del 5º bloque de ensayos – Comb. 2 (Segunda parte).

Temperatura de digestión	$T_D$	°C	33	Producción horaria de biogás (potencia)	$Pot_{v, gas}$	Kw	531
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT \text{ caldera}}$	-	0,90	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	$kcal \cdot h^{-1}$	115.089
Temperatura lodo fresco entrada a inter. caldera	$T_{Fe}$	°C	33	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	14.225
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	$T_{Fs}$	°C	34	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	143.682
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{In}$	°C	37,39
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	$m^2$	8,35
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	$kcal \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	$m^3 \cdot h^{-1}$	17,96
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	$kcal \cdot h^{-1}$	161.642
Poder calorífico del biogás (65% de $CH_4$ )	$PCI_{CH_4}$	$kcal \cdot m^{-3}$	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	33,81
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	57,69
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	36,95

**Tabla A.2.6.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con residuo de matadero ( $L_{dig}:Aditivo - 2:0,5$ ), del 5º bloque de ensayos – Comb. 2 (Tercera parte).

				<b>CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)</b>			
<b>SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)</b>				<b>Definición</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>
<b>Definición</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>				
				Energía generada contenida en el biogas	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	4.653.029
Producción anual de biogás	$Pot_{v,gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	801.479	Potencia total generada en cogeneración	$Pot_{cog}$	kW	620
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$Pot_{elec,cog}$	kW	217
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia térmica de cogeneración	$Pot_{term,cog}$	kW	279
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	240.444
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,9	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	159.647
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7.500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%q_{aprov}$	%	66,40
<b>DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO</b>				<b>DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)</b>			
<b>Definición</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>	<b>Definición</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	22	Sólidos totales salida digestión (suma 2 digestores)	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	9.990
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	45,4
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	11.400	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	817
Precio energía eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,032
Distancia transporte de residuos	$Dist$	$km \cdot día^{-1}$	20	Energía eléctrica generada en cogeneración (S3D)	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	8.924
Coste transporte 1 (referido a kms)	$C_{trans,1}$	€·km <sup>-1</sup>	1,50	Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	2.476
Coste transporte 2 (referido a peso transportado)	$C_{trans,2}$	€·Tm <sup>-1</sup>	10,0	% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	78,28
Inversión estimada equipos pretratamiento	$Inv$	€	100.000	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€·día <sup>-1</sup>	235
Periodo inversión	$n$	años	10,00	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	0,009
Interés inversión	$i$	—	0,10	Coste consumo eléctrico + gestión lodos	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	<b>0,041</b>
Precio compra/venta residuo	$C_{residuo}$	€/Tm	<b>5,0</b>	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	75

**Tabla A.2.6.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con residuo de matadero ( $L_{dig}:Aditivo - 2:0,5$ ), del 5º bloque de ensayos – Comb. 2 (Cuarta parte).

	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,003
	Cuota amortización	$C_{amort}$	–	0,163
	Anualidad amortización	$C_{amort}$	€·año <sup>-1</sup>	16.275
	Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	45
	Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,0017
	Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	45
	Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,002
	<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	0,047
	<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	0,045

**Tabla A.2.7.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con deyecciones ganaderas ( $L_{dig}$ :Aditivo - 2:0,5), del 5º bloque de ensayos – Comb. 3 (Primera parte).

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Carga orgánica aportada por lodo mixto	OLR <sub>1</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	25.852	Carga orgánica aportada por lodo mixto	OLR <sub>1</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,29
Caudal aportado por lodo mixto	Q <sub>1</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	4,0	Caudal aportado por lodo mixto	Q <sub>1</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	150
Carga orgánica aportada por deyecciones ganaderas	OLR <sub>2</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	3	Carga orgánica aportada por deyecciones ganaderas	OLR <sub>2</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0,30
Caudal aportado por deyecciones ganaderas	Q <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	150.000	Caudal aportado por deyecciones ganaderas	Q <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	296,053
Carga orgánica aportada por aditivo	OLR <sub>3</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,00	Carga orgánica aportada por aditivo	OLR <sub>3</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Caudal aportado por aditivo	Q <sub>3</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0,80	Caudal aportado por aditivo	Q <sub>3</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Caudal total de lodo a digestión (1 solo digestor)	Q <sub>D</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0,40	Caudal total de lodo a digestión (1 solo digestor)	Q <sub>D</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	446,053
Carga orgánica total a digestión	OLR <sub>D</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	296.053	Carga orgánica total a digestión	OLR <sub>D</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,58
Concentración de ST a digestión	[ST] <sub>D</sub>	% (p/v)	1,0	Concentración de ST a digestión	[ST] <sub>D</sub>	% (p/v)	1,9
Concentración de SV a digestión	[SV] <sub>D</sub>	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	[SV] <sub>D</sub>	% (p/v)	1,2
% Materia volátil a digestión	% <sub>SV</sub>	%	0	% Materia volátil a digestión	% <sub>SV</sub>	%	66,16
Tiempo de retención hidráulico en digestión	q <sub>h,D1</sub>	día	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	q <sub>h,D1</sub>	día	7,8
Densidad de aditivo	ρ <sub>3</sub>	g/ml	1,00				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	V <sub>D,útil</sub>	m <sup>3</sup>	3.497	Producción diaria de biogás	V <sub>gas</sub>	Nm <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	2.056
BMP Lodo mixto (valor teórico lodo mixto)	BMP <sub>1</sub>	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ·kgSV <sub>alim</sub> <sup>-1</sup>	0,21	Caudal de lodo salida digestor	Q <sub>SD</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	446
BMP Deyecciones ganaderas	BMP <sub>2</sub>	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ·kgSV <sub>alim</sub> <sup>-1</sup>	0,378	Concentración de ST en salida digestor	[ST] <sub>SD</sub>	% (p/v)	1,40
BMP Aditivo	BMP <sub>3</sub>	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ·kgSV <sub>alim</sub> <sup>-1</sup>	0	Concentración de SV en salida digestor	[SV] <sub>SD</sub>	% (p/v)	0,70
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	%CH <sub>4</sub>	%	65	% Materia volátil en lodo digerido	% <sub>SSV</sub>	%	53,98
% Reducción de SV en digestión	%R <sub>SV</sub>	%	40	Sólidos volátiles eliminados en digestión	SV <sub>elim</sub>	kg <sub>SV</sub> ·día <sup>-1</sup>	2.214
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores

**Tabla A.2.7.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con deyecciones ganaderas ( $L_{dig}$ :Aditivo - 2:0,5), del 5º bloque de ensayos – Comb. 3 (Segunda parte).

Calor específico del lodo	$C_{e_{lodo}}$	$kcal \cdot m^{-3} \cdot ^\circ C^{-1}$	1.000	Producción diaria de biogás	$V_{gas}$	$(Nm^3) \cdot día^{-1}$	2.056
Temperatura del lodo espesado	$T_F$	$^\circ C$	15	Producción horaria de biogás	$V_{gas}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	86
Temperatura de digestión	$T_D$	$^\circ C$	33	Producción horaria de biogás (potencia)	$Pot_{V_{gas}}$	Kw	497
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT_{caldera}}$	-	0,90	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	$kcal \cdot h^{-1}$	334.540
Temperatura lodo fresco entrada a inter. caldera	$T_{Fe}$	$^\circ C$	33	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	41.348
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	$T_{Fs}$	$^\circ C$	34	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	417.653
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	$^\circ C$	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{In}$	$^\circ C$	37,39
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	$^\circ C$	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	$m^2$	24,28
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	$kcal \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	$m^3 \cdot h^{-1}$	52,21
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	$kcal \cdot h^{-1}$	469.859
Poder calorífico del biogás (65% de $CH_4$ )	$PCI_{CH_4}$	$kcal \cdot m^{-3}$	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	98,27
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	-12,59
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	114,69

**Tabla A.2.7.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con deyecciones ganaderas ( $L_{dig}:Aditivo - 2:0,5$ ), del 5º bloque de ensayos – Comb. 3 (Tercera parte).

				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)			
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)				Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Definición	Símbolo	Unidades	Valores				
				Energía generada contenida en el biogás	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	4.357.628
Producción anual de biogás	$Pot_{V,gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	750.596	Potencia total generada en cogeneración	$Pot_{cog}$	kW	581
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$Pot_{elec,cog}$	kW	203
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia térmica de cogeneración	$Pot_{term,cog}$	kW	261
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	225.179
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,9	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	464.058
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7.500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%q_{aprov}$	%	206,08
DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO				DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	22	Sólidos totales salida digestión (suma 2 digestores)	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	12.308
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	55,9
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	11.400	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	1.007
Precio energía eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,039
Distancia transporte de residuos	Dist	$km \cdot día^{-1}$	40	Energía eléctrica generada en cogeneración (S3D)	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	8.357
Coste transporte 1 (referido a kms)	$C_{trans,1}$	€/km	1,50	Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	3.043
Coste transporte 2 (referido a peso transportado)	$C_{trans,2}$	€/Tm	10,0	% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	73,31
Inversión estimada equipos pretratamiento	Inv	€	0	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/día	289
Periodo inversión	n	años	10,00	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,011
Interés inversión	i	_	0,10	Coste consumo eléctrico + gestión lodos	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	<b>0,050</b>
Precio compra/venta residuo	$C_{residuo}$	€/Tm	<b>-7,62</b>	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/día	4.456

**Tabla A.2.7.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con deyecciones ganaderas ( $L_{dig}:Aditivo - 2:0,5$ ), del 5º bloque de ensayos – Comb. 3 (Cuarta parte).

Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,172
Cuota amortización	$C_{amort}$	–	0,163
Anualidad amortización	$C_{amort}$	€/año <sup>-1</sup>	0
Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€/día <sup>-1</sup>	0
Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,0000
Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€/día <sup>-1</sup>	-4511
Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	-0,174
<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	<b>0,048</b>
<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	<b>0,222</b>

**Tabla A.2.8.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con lodo mixto, del 6º bloque de ensayos (Primera parte).**

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	$Q_A$	$m^3 \cdot día^{-1}$	78.500	Carga orgánica aportada por lodo mixto	$OLR_1$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	1,52
Concentración de ST en lodo mixto	$[ST]_1$	% (p/v)	5,00	Caudal aportado por lodo mixto	$Q_1$	$m^3 \cdot día^{-1}$	250
Concentración de SV en lodo mixto	$[SV]_1$	% (p/v)	3,70	Carga orgánica aportada por aditivo	$OLR_2$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0
Caudal másico de lodo mixto	$M_1$	$kg \cdot día^{-1}$	250.000	Caudal aportado por aditivo	$Q_2$	$m^3 \cdot día^{-1}$	0
Densidad de lodo mixto	$\rho_1$	g/ml	1,0	Carga orgánica aportada por aditivo	$OLR_3$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0
Concentración de ST en aditivo	$[ST]_2$	% (p/v)	0	Caudal aportado por aditivo	$Q_3$	$m^3 \cdot día^{-1}$	0
Concentración de SV en aditivo	$[SV]_2$	% (p/v)	0	Caudal total de lodo a digestión (1 solo digestor)	$Q_D$	$m^3 \cdot día^{-1}$	250
Caudal másico de aditivo	$M_2$	$kg \cdot día^{-1}$	0	Carga orgánica total a digestión	$OLR_D$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	1,52
Densidad de aditivo	$\rho_2$	g/ml	0	Concentración de ST a digestión	$[ST]_D$	% (p/v)	5,00
Concentración de ST en aditivo	$[ST]_3$	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	$[SV]_D$	% (p/v)	3,70
Concentración de SV en aditivo	$[SV]_3$	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	$\%_{SV}$	%	74,00
Caudal másico de aditivo	$M_3$	$kg \cdot día^{-1}$	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	$q_{h,D1}$	día	24,40
Densidad de aditivo	$\rho_3$	g/ml	0				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	$V_{D,util}$	$m^3$	6.100	Producción diaria de biogás	$V_{gas}$	$Nm^3 \cdot día^{-1}$	2.988
BMP Lodo mixto (valor teórico lodo mixto)	$BMP_1$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SV,alim}^{-1}$	0,21	Caudal de lodo salida digestor	$Q_{SD}$	$m^3 \cdot d^{-1}$	250
BMP Aditivo	$BMP_2$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SV,alim}^{-1}$	0	Concentración de ST en salida digestor	$[ST]_{SD}$	% (p/v)	3,30
BMP Aditivo	$BMP_3$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SV,alim}^{-1}$	0	Concentración de SV en salida digestor	$[SV]_{SD}$	% (p/v)	2,00
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	$\%CH_4$	%	65	% Materia volátil en lodo digerido	$\%_{SSV}$	%	61,02
% Reducción de SV en digestión	$\%R_{SV}$	%	45	Sólidos volátiles eliminados en digestión	$SV_{elim}$	$kg_{SV} \cdot día^{-1}$	4.163
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Calor específico del lodo	$Ce_{lodo}$	$kcal \cdot m^{-3} \cdot ^\circ C^{-1}$	1.000	Producción diaria de biogás a 35°C	$V_{gas}$	$(Nm^3) \cdot día^{-1}$	2.988

**Tabla A.2.8.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con lodo mixto, del 6º bloque de ensayos (Segunda parte).

Temperatura del lodo espesado	$T_F$	°C	15	Producción horaria de biogás a 35°C	$V_{gas}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	125
Temperatura de digestión	$T_D$	°C	35	Producción horaria de biogás (potencia)	$Pot_{V_{gas}}$	Kw	723
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT \text{ caldera}}$	-	0,90	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	$kcal \cdot h^{-1}$	208.333
Temperatura lodo fresco entrada a inter. caldera	$T_{Fe}$	°C	35	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	25.749
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	$T_{Fs}$	°C	36	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	260.092
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{In}$	°C	35,38
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	$m^2$	15,98
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	$kcal \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	$m^3 \cdot h^{-1}$	32,51
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	$kcal \cdot h^{-1}$	292.603
Poder calorífico del biogás (65% de $CH_4$ )	$PCI_{CH_4}$	$kcal \cdot m^{-3}$	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	61,20
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	63,32
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	49,15

**Tabla A.2.8.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con lodo mixto, del 6º bloque de ensayos (Tercera parte).

				<b>CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)</b>			
<b>SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)</b>				<b>Definición</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>
<b>Definición</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>				
				Energía generada contenida en el biogás	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	6.332.633
Producción anual de biogás	$P_{otv,gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	1.090.788	Potencia total generada en cogeneración	$P_{ot,cog}$	kW	844
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$P_{otelec,cog}$	kW	296
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia térmica de cogeneración	$P_{oterm,cog}$	kW	380
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	327.237
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,90	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	288.991
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%q_{q,aprov}$	%	88,31
<b>DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)</b>				<b>DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)</b>			
<b>Definición</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>	<b>Definición</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	20	Sólidos totales salida digestión (suma 3 digestores)	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	25.013
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	125,10
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	37.000	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	2.251
Precio energía eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,029
				Energía eléctrica generada en cogeneración	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	18.217
				Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	18.783
				% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	49,24
				Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/día <sup>-1</sup>	1.784
				Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,023
				Coste total (consumo eléctrico + gestión lodos)	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	<b>0,051</b>

**Tabla A.2.9.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con residuo industrial ( $L_{dig}$ :Aditivo - 2:0,5) del 6º bloque de ensayos – Comb. 2 (Primera parte).

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	$Q_A$	$m^3 \cdot día^{-1}$	78.500	Carga orgánica aportada por lodo mixto	$OLR_1$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	1,52
Concentración de ST en lodo mixto	$[ST]_1$	% (p/v)	5,00	Caudal aportado por lodo mixto	$Q_1$	$m^3 \cdot día^{-1}$	250
Concentración de SV en lodo mixto	$[SV]_1$	% (p/v)	3,70	Carga orgánica aportada por residuo industrial	$OLR_2$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0,38
Caudal másico de lodo mixto	$M_1$	$kg \cdot día^{-1}$	250.000	Caudal aportado por residuo industrial	$Q_2$	$m^3 \cdot día^{-1}$	55,60
Densidad de lodo mixto	$\rho_1$	g/ml	1,0	Carga orgánica aportada por aditivo	$OLR_3$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0
Concentración de ST en residuo industrial	$[ST]_2$	% (p/v)	4,30	Caudal aportado por aditivo	$Q_3$	$m^3 \cdot día^{-1}$	0
Concentración de SV en residuo industrial	$[SV]_2$	% (p/v)	4,20	Caudal total de lodo a digestión (1 solo digestor)	$Q_D$	$m^3 \cdot día^{-1}$	305,6
Caudal másico de residuo industrial	$M_2$	$kg \cdot día^{-1}$	55.600	Carga orgánica total a digestión	$OLR_D$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	1,90
Densidad de residuo industrial	$\rho_2$	g/ml	1,00	Concentración de ST a digestión	$[ST]_D$	% (p/v)	4,90
Concentración de ST en aditivo	$[ST]_3$	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	$[SV]_D$	% (p/v)	3,80
Concentración de SV en aditivo	$[SV]_3$	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	$\%_{SV}$	%	77,77
Caudal másico de aditivo	$M_3$	$kg \cdot día^{-1}$	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	$q_{h,D1}$	día	20,00
Densidad de aditivo	$\rho_3$	g/ml	0				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	$V_{D,útil}$	$m^3$	6.100	Producción diaria de biogás	$V_{gas}$	$Nm^3 \cdot día^{-1}$	4.305
BMP Lodo mixto (valor teórico lodo mixto)	$BMP_1$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SValim}^{-1}$	0,21	Caudal de lodo salida digestor	$Q_{SD}$	$m^3 \cdot día^{-1}$	306
BMP Residuo industrial	$BMP_2$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SValim}^{-1}$	0,37	Concentración de ST en salida digestor	$[ST]_{SD}$	% (p/v)	3,20
BMP Aditivo	$BMP_3$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SValim}^{-1}$	0	Concentración de SV en salida digestor	$[SV]_{SD}$	% (p/v)	2,10
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	$\%CH_4$	%	65	% Materia volátil en lodo digerido	$\%_{SSV}$	%	65,80
% Reducción de SV en digestión	$\%R_{SV}$	%	45	Sólidos volátiles eliminados en digestión	$SV_{elim}$	$kg_{SV} \cdot día^{-1}$	5.203
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Calor específico del lodo	$Ce_{lodo}$	$kcal \cdot m^{-3} \cdot ^\circ C^{-1}$	1.000	Producción diaria de biogás a 35°C	$V_{gas}$	$(Nm^3) \cdot día^{-1}$	4.305

**Tabla A.2.9.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con residuo industrial ( $L_{dig}$ :Aditivo - 2:0,5) del 6º bloque de ensayos – Comb. 2 (Segunda parte).

Temperatura del lodo espesado	$T_F$	°C	15	Producción horaria de biogás a 35°C	$V_{gas}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	179
Temperatura de digestión	$T_D$	°C	35	Producción horaria de biogás (potencia)	$Pot_{V_{gas}}$	Kw	1041
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT \text{ caldera}}$	-	0,90	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	$kcal \cdot h^{-1}$	254.667
Temperatura lodo fresco entrada a inter. caldera	$T_{Fe}$	°C	35	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	31.476
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	$T_{Fs}$	°C	36	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	317.936
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{In}$	°C	35,38
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	$m^2$	19,53
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	$kcal \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	$m^3 \cdot h^{-1}$	39,74
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	$kcal \cdot h^{-1}$	357.678
Poder calorífico del biogás (65% de $CH_4$ )	$PCI_{CH_4}$	$kcal \cdot m^{-3}$	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	74,81
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	104,57
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	41,70

**Tabla A.2.9.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con residuo industrial ( $L_{dig}$ :Aditivo - 2:0,5) del 6º bloque de ensayos – Comb. 2 (Tercera parte).**

SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)			
				Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Energía generada contenida en el biogás	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	9.122.562
Producción anual de biogás	$Pot_{V,gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	1.571.350	Potencia total generada en cogeneración	$Pot_{cog}$	kW	1216
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$Pot_{elec,cog}$	kW	426
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia térmica de cogeneración	$Pot_{term,cog}$	kW	547
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	471.405
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,9	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	353.262
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7.500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%q_{aprov}$	%	74,94
DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO				DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	20	Sólidos totales salida digestión (suma 3 digestores)	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	28.996
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	145,0
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	37.000	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	2.610
Precio energía eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,033
Distancia transporte de residuos	Dist	$km \cdot día^{-1}$	0	Energía eléctrica generada en cogeneración (S3D)	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	26.243
Coste transporte 1 (referido a kms)	$C_{trans,1}$	€·km <sup>-1</sup>	0,00	Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	10.757
Coste transporte 2 (referido a peso transportado)	$C_{trans,2}$	€·Tm <sup>-1</sup>	0,0	% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	70,93
Inversión estimada equipos pretratamiento	Inv	€	0	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€·día <sup>-1</sup>	1.022
Periodo inversión	n	años	10,00	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€·m <sup>3</sup> agua trat.	0,013
Interés inversión	i	-	0,10	Coste consumo eléctrico + gestión lodos	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>3</sup> agua trat.	<b>0,046</b>
Precio compra/venta residuo	$C_{residuo}$	€/Tm	<b>2,2</b>	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€·d <sup>-1</sup>	0

**Tabla A.2.9.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con residuo industrial ( $L_{dig}:Aditivo - 2:0,5$ ) del 6º bloque de ensayos – Comb. 2 (Tercera parte).

	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,000
	Cuota amortización	$C_{amort}$	—	0,163
	Anualidad amortización	$C_{amort}$	€·año <sup>-1</sup>	0
	Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	0
	Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,0000
	Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€·día <sup>-1</sup>	372
	Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,005
	<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	<b>0,051</b>
	<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> agua trat.	<b>0,046</b>



ANEXO 3: Simulaciones del proceso de digestión anaerobia en semicontinuo con uso de levadura.



**Tabla A.3.1.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con lodo mixto. (Primera parte).

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	$Q_A$	$m^3 \cdot día^{-1}$	25.852	Carga orgánica aportada por lodo mixto	$OLR_1$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	1,06
Concentración de ST en lodo mixto	$[ST]_1$	% (p/v)	3,1	Caudal aportado por lodo mixto	$Q_1$	$m^3 \cdot día^{-1}$	150
Concentración de SV en lodo mixto	$[SV]_1$	% (p/v)	2,47	Carga orgánica aportada por aditivo	$OLR_2$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0
Caudal másico de lodo mixto	$M_1$	$kg \cdot día^{-1}$	150.000	Caudal aportado por aditivo	$Q_2$	$m^3 \cdot día^{-1}$	0
Densidad de lodo mixto	$\rho_1$	g/ml	1,0	Carga orgánica aportada por aditivo	$OLR_3$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0
Concentración de ST en aditivo	$[ST]_2$	% (p/v)	0	Caudal aportado por aditivo	$Q_3$	$m^3 \cdot día^{-1}$	0
Concentración de SV en aditivo	$[SV]_2$	% (p/v)	0	Caudal total de lodo a digestión (1 solo digestor)	$Q_D$	$m^3 \cdot día^{-1}$	150
Caudal másico de aditivo	$M_2$	$kg \cdot día^{-1}$	0	Carga orgánica total a digestión	$OLR_D$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	1,06
Densidad de aditivo	$\rho_2$	g/ml	1	Concentración de ST a digestión	$[ST]_D$	% (p/v)	3,1
Concentración de ST en aditivo	$[ST]_3$	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	$[SV]_D$	% (p/v)	2,5
Concentración de SV en aditivo	$[SV]_3$	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	$\%_{SV}$	%	78,91
Caudal másico de aditivo	$M_3$	$kg \cdot día^{-1}$	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	$q_{h,D1}$	día	23,31
Densidad de aditivo	$\rho_3$	g/ml	1				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	$V_{D,útil}$	$m^3$	3497	Producción diaria de biogás	$V_{gas}$	$Nm^3 \cdot día^{-1}$	679
BMP Lodo mixto	$BMP_1$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SV_{alim}}^{-1}$	0,11	Caudal de lodo salida digestor	$Q_{SD}$	$m^3 \cdot día^{-1}$	150
BMP Aditivo	$BMP_2$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SV_{alim}}^{-1}$	0	Concentración de ST en salida digestor	$[ST]_{SD}$	% (p/v)	2,2
BMP Aditivo	$BMP_3$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SV_{alim}}^{-1}$	0	Concentración de SV en salida digestor	$[SV]_{SD}$	% (p/v)	1,5
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	$\%CH_4$	%	60	% Materia volátil en lodo digerido	$\%_{SSV}$	%	69,54
% Reducción de SV en digestión	$\%R_{SV}$	%	39	Sólidos volátiles eliminados en digestión	$SV_{elim}$	$kg_{SV} \cdot día^{-1}$	1.445
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Calor específico del lodo	$Ce_{lodo}$	$kcal \cdot m^{-3} \cdot ^\circ C^{-1}$	1.000	Producción diaria de biogás a 35°C	$V_{gas}$	$(Nm^3) \cdot día^{-1}$	679
Temperatura del lodo espesado	$T_F$	°C	15	Producción horaria de biogás a 35°C	$V_{gas}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	28

**Tabla A.3.1.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con lodo mixto. (Segunda parte).**

Temperatura de digestión	$T_D$	°C	35	Producción horaria de biogás (potencia)	$Pot_{v, gas}$	Kw	164
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT \text{ caldera}}$	-	0,9	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	kcal·h <sup>-1</sup>	125.000
Temperatura lodo fresco entrada a inter. caldera	$T_{Fe}$	°C	35	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	kcal·h <sup>-1</sup>	15.449
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	$T_{Fs}$	°C	36	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	kcal·h <sup>-1</sup>	156.055
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{In}$	°C	35,38
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	m <sup>2</sup>	9,59
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	kcal·h <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ·°C <sup>-1</sup>	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	19,51
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	kcal·h <sup>-1</sup>	175.562
Poder calorífico del biogás (65% de CH <sub>4</sub> )	$PCI_{CH_4}$	kcal·m <sup>-3</sup>	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	36,72
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	-8,42
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	129,74

**Tabla A.3.1.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con lodo mixto. (Tercera parte).

ENTRADA DE DATOS LODO (C)				DATOS DE SALIDA LODO (C)			
				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)			
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)				Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Definición	Símbolo	Unidades	Valores				
				Energía generada contenida en el biogás	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	1.439.350
Producción anual de biogás	$P_{otV, gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	247.926	Potencia total generada en cogeneración	$P_{ot,cog}$	kW	192
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$P_{ot_{elec,cog}}$	kW	67
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia térmica de cogeneración	$P_{ot_{term,cog}}$	kW	86
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	74.378
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,9	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	173.394
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7.500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%q_{aprov}$	%	233,13
DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)				DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	22	Sólidos totales salida digestión (suma 2 digestores)	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	6.500
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	29,5
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	11.400	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	532
Precio energía eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,021
Poder calorífico gasóil	$PCI_{gasóil}$	$kcal \cdot L^{-1}$	8.330	Energía eléctrica generada en cogeneración (S2D)	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	2.760
Rendimiento caldera gasóil	$\eta_{CAL}$	-	0,90	Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	8.640
Precio gasoil	$P_{gasóil}$	€·L <sup>-1</sup>	1,05	% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	24,21
				Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/día <sup>-1</sup>	821
				Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€·m <sup>-3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,032
				Coste consumo gasoil para calefacción digestor	$C_{cons,gasóil}$	€·m <sup>-3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,026
				Coste total (consumo eléctrico + gasóil + gestión lodos)	$C_{TOTAL}$	€·m <sup>-3</sup> <sub>agua trat.</sub>	<b>0,078</b>



**Tabla A.3.2.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 2% p/v. (Primera parte).

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	Q <sub>A</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	25.852	Carga orgánica aportada por lodo mixto	OLR <sub>1</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,06
Concentración de ST en lodo mixto	[ST] <sub>1</sub>	% (p/v)	3,1	Caudal aportado por lodo mixto	Q <sub>1</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	150
Concentración de SV en lodo mixto	[SV] <sub>1</sub>	% (p/v)	2,47	Carga orgánica aportada por levadura	OLR <sub>2</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0,26
Caudal másico de lodo mixto	M <sub>1</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	150.000	Caudal aportado por levadura	Q <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	3,0
Densidad de lodo mixto	ρ <sub>1</sub>	g/ml	1,0	Carga orgánica aportada por aditivo	OLR <sub>3</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de ST en levadura	[ST] <sub>2</sub>	% (p/v)	32,0	Caudal aportado por aditivo	Q <sub>3</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de SV en levadura	[SV] <sub>2</sub>	% (p/v)	30,0	Caudal total de lodo a digestión (1 solo digestor)	Q <sub>D</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	153,0
Caudal másico de levadura	M <sub>2</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	3.000	Carga orgánica total a digestión	OLR <sub>D</sub>	kg <sub>SV</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	<b>1,32</b>
Densidad de levadura	ρ <sub>2</sub>	g/ml	1,0	Concentración de ST a digestión	[ST] <sub>D</sub>	% (p/v)	3,7
Concentración de ST en aditivo	[ST] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	[SV] <sub>D</sub>	% (p/v)	3,0
Concentración de SV en aditivo	[SV] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	% <sub>SV</sub>	%	81,43
Caudal másico de aditivo	M <sub>3</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	q <sub>h,D1</sub>	día	22,9
Densidad de aditivo	ρ <sub>3</sub>	g/ml	1				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	V <sub>D,útil</sub>	m <sup>3</sup>	3497	Producción diaria de biogás	V <sub>gas</sub>	Nm <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1.519
BMP Lodo mixto	BMP <sub>1</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SValim</sub> <sup>-1</sup>	0,11	Caudal de lodo salida digestor	Q <sub>SD</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	153
BMP Levadura	BMP <sub>2</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SValim</sub> <sup>-1</sup>	0,56	Concentración de ST en salida digestor	[ST] <sub>SD</sub>	% (p/v)	2,2
BMP Aditivo	BMP <sub>3</sub>	Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> ·kg <sub>SValim</sub> <sup>-1</sup>	0	Concentración de SV en salida digestor	[SV] <sub>SD</sub>	% (p/v)	1,5
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	%CH <sub>4</sub>	%	60	% Materia volátil en lodo digerido	% <sub>SSV</sub>	%	68,68
% Reducción de SV en digestión	%R <sub>SV</sub>	%	50	Sólidos volátiles eliminados en digestión	SV <sub>elim</sub>	kg <sub>SV</sub> ·día <sup>-1</sup>	2.303
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Calor específico del lodo	Ce <sub>lodo</sub>	kcal·m <sup>-3</sup> ·°C <sup>-1</sup>	1.000	Producción diaria de biogás a 35°C	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·día <sup>-1</sup>	1.519
Temperatura del lodo espesado	T <sub>F</sub>	°C	15	Producción horaria de biogás a 35°C	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	63

**Tabla A.3.2.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 2% p/v. (Segunda parte).

Temperatura de digestión	$T_D$	°C	35	Producción horaria de biogás (potencia)	$Pot_{V, gas}$	Kw	368
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT \text{ caldera}}$	-	0,9	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	$kcal \cdot h^{-1}$	127.500
Temperatura lodo fresco entrada a inter. caldera	$T_{Fe}$	°C	35	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	15.758
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	$T_{Fs}$	°C	36	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	159.176
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{In}$	°C	35,38
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	$m^2$	9,78
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	$kcal \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	$m^3 \cdot h^{-1}$	19,90
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	$kcal \cdot h^{-1}$	179.073
Poder calorífico del biogás (65% de $CH_4$ )	$PCI_{CH_4}$	$kcal \cdot m^{-3}$	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	37,45
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	25,85
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	59,17

**Tabla A.3.2.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 2% p/v. (Tercera parte).**

				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)			
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)				Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Definición	Símbolo	Unidades	Valores				
				Energía generada contenida en el biogas	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	3.219.333
Producción anual de biogás	$Pot_{V,gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	554.526	Potencia total generada en cogeneración	$Pot_{cog}$	kW	429
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$Pot_{elec,cog}$	kW	150
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia térmica de cogeneración	$Pot_{term,cog}$	kW	193
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	166.358
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,9	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	176.862
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7.500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%_{q,aprov}$	%	106,31
DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO				DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	22	Sólidos totales salida digestión (suma 2 digestores)	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	6.705
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	30,5
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	11.400	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	549
Precio energía eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,021
Distancia transporte de residuos	Dist	$km \cdot día^{-1}$	0	Energía eléctrica generada en cogeneración	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	6.174
Coste transporte 1 (referido a kms)	$C_{trans,1}$	€/km <sup>1</sup>	0,00	Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	5.226
Coste transporte 2 (referido a peso transportado)	$C_{trans,2}$	€/Tm <sup>1</sup>	0,0	% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	54,16
Inversión estimada equipos pretratamiento	Inv	€	0	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/día <sup>1</sup>	496
Periodo inversión	n	años	10,00	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,019
Interés inversión	i	_	0,10	Coste consumo eléctrico + gestión lodos	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	<b>0,040</b>
Poder calorífico gasoil	$PCI_{gasoil}$	$kcal \cdot L^{-1}$	8.330	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/día <sup>1</sup>	0
Rendimiento caldera gasoil	$\eta_{CAL}$	-	0,90	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,000
Precio gasoil	$P_{gasoil}$	€/L <sup>1</sup>	1,05	Cuota amortización	$C_{amort}$	_	0,163

**Tabla A.3.2.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 2% p/v. (Cuarta parte).

Precio compra/venta residuo	$C_{\text{residuo}}$	€/Tm	<b>150,0</b>	Anualidad amortización	$C_{\text{amort}}$	€·año <sup>-1</sup>	0
				Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{\text{trans}}$	€·día <sup>-1</sup>	0
				Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{\text{trans}}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,0000
				Coste consumo gasoil para calefacción digestor	$C_{\text{cons.gasóil}}$	€·m <sup>-3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,003
				Coste compra/venta residuo	$C_{\text{trans}}$	€·día <sup>-1</sup>	0
				Coste compra/venta residuo	$C_{\text{trans}}$	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,050
				<b>COSTE TOTAL cuando precio aditivo=0</b>	$C_{\text{TOTAL}}$	€·m <sup>-3</sup> <sub>agua trat.</sub>	<b>0,043</b>

**Tabla A.3.3.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 3% p/v (Primera parte).

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	$Q_A$	$m^3 \cdot día^{-1}$	25.852	Carga orgánica aportada por lodo mixto	$OLR_1$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	1,06
Concentración de ST en lodo mixto	$[ST]_1$	% (p/v)	3,1	Caudal aportado por lodo mixto	$Q_1$	$m^3 \cdot día^{-1}$	150
Concentración de SV en lodo mixto	$[SV]_1$	% (p/v)	2,47	Carga orgánica aportada por levadura	$OLR_2$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0,39
Caudal másico de lodo mixto	$M_1$	$kg \cdot día^{-1}$	150.000	Caudal aportado por levadura	$Q_2$	$m^3 \cdot día^{-1}$	4,5
Densidad de lodo mixto	$\rho_1$	g/ml	1,0	Carga orgánica aportada por aditivo	$OLR_3$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0
Concentración de ST en levadura	$[ST]_2$	% (p/v)	32,0	Caudal aportado por aditivo	$Q_3$	$m^3 \cdot día^{-1}$	0
Concentración de SV en levadura	$[SV]_2$	% (p/v)	30,0	Caudal total de lodo a digestión	$Q_D$	$m^3 \cdot día^{-1}$	154,5
Caudal másico de levadura	$M_2$	$kg \cdot día^{-1}$	4.500	Carga orgánica total a digestión	$OLR_D$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	<b>1,45</b>
Densidad de levadura	$\rho_2$	g/ml	1,0	Concentración de ST a digestión	$[ST]_D$	% (p/v)	4,0
Concentración de ST en aditivo	$[ST]_3$	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	$[SV]_D$	% (p/v)	3,3
Concentración de SV en aditivo	$[SV]_3$	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	$\%_{SV}$	%	82,40
Caudal másico de aditivo	$M_3$	$kg \cdot día^{-1}$	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	$q_{h,D1}$	día	22,6
Densidad de aditivo	$\rho_3$	g/ml	1				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	$V_{D,útil}$	$m^3$	3497	Producción diaria de biogás	$V_{gas}$	$Nm^3 \cdot día^{-1}$	1.939
BMP Lodo mixto	$BMP_1$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SV_{alim}}^{-1}$	0,11	Caudal de lodo salida digestor	$Q_{SD}$	$m^3 \cdot día^{-1}$	155
BMP Levadura	$BMP_2$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SV_{alim}}^{-1}$	0,56	Concentración de ST en salida digestor	$[ST]_{SD}$	% (p/v)	2,3
BMP Aditivo	$BMP_3$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SV_{alim}}^{-1}$	0	Concentración de SV en salida digestor	$[SV]_{SD}$	% (p/v)	1,6
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	$\%CH_4$	%	60	% Materia volátil en lodo digerido	$\%_{SSV}$	%	70,06
% Reducción de SV en digestión	$\%R_{SV}$	%	50	Sólidos volátiles eliminados en digestión	$SV_{elim}$	$kg_{SV} \cdot día^{-1}$	2.528
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Calor específico del lodo	$Ce_{lodo}$	$kcal \cdot m^{-3} \cdot ^\circ C^{-1}$	1000	Producción diaria de biogás a 35°C	$V_{gas}$	$(Nm^3) \cdot día^{-1}$	1.939
Temperatura del lodo espesado	$T_F$	°C	15	Producción horaria de biogás a 35°C	$V_{gas}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	81

**Tabla A.3.3.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 3% p/v (Segunda parte).**

Temperatura de digestión	$T_D$	°C	35	Producción horaria de biogás (potencia)	$P_{ot_{v, gas}}$	Kw	469
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT \text{ caldera}}$	-	0,9	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	$kcal \cdot h^{-1}$	128.750
Temperatura lodo fresco entrada a inter. caldera	$T_{Fe}$	°C	35	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	15.913
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	$T_{Fs}$	°C	36	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	160.737
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{In}$	°C	35,38
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	$m^2$	9,88
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	$kcal \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	$m^3 \cdot h^{-1}$	20,09
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	$kcal \cdot h^{-1}$	180.829
Poder calorífico del biogás (65% de $CH_4$ )	$PCI_{CH_4}$	$kcal \cdot m^{-3}$	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	37,82
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	42,98
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	46,81

**Tabla A.3.3.-Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 3% p/v (Tercera parte).**

				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)			
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)				Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Definición	Símbolo	Unidades	Valores				
				Energía generada contenida en el biogas	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	4.109.325
Producción anual de biogás	$Pot_{V,gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	707.826	Potencia total generada en cogeneración	$Pot_{cog}$	kW	548
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	35	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$Pot_{elec,cog}$	kW	192
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	45	Potencia térmica de cogeneración	$Pot_{term,cog}$	kW	247
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	20	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	212.348
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,9	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	178.596
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%q_{aprov}$	%	84,11
DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO				DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	22	Sólidos totales salida digestión (suma 2 digestores)	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	7.215
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	32,8
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	11.400	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	590
Precio energía eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,023
Distancia transporte de residuos	Dist	$km \cdot día^{-1}$	0	Energía eléctrica generada en cogeneración (S3D)	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	7.881
Coste transporte 1 (referido a kms)	$C_{trans,1}$	€/km <sup>1</sup>	0,00	Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	3.519
Coste transporte 2 (referido a peso transportado)	$C_{trans,2}$	€/Tm <sup>1</sup>	0,0	% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	69,13
Inversión estimada equipos pretratamiento	Inv	€	0	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/día <sup>1</sup>	334
Periodo inversión	n	años	10,00	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,013
Interés inversión	i	_	0,10	Coste consumo eléctrico + gestión lodos	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	<b>0,036</b>
Poder calorífico gasoil	$PCI_{gasoil}$	$kcal \cdot L^{-1}$	8.330	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/día <sup>1</sup>	0
Rendimiento caldera gasoil	$\eta_{CAL}$	-	0,90	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,000
Precio gasoil	$P_{gasoil}$	€/L <sup>1</sup>	1,05	Cuota amortización	$C_{amort}$	_	0,163

**Tabla A.3.3.-Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR C con levadura al 3% p/v (Cuarta parte).**

Precio compra/venta residuo	$C_{\text{residuo}}$	€/Tm	<b>122,0</b>	Anualidad amortización	$C_{\text{amort}}$	€·año <sup>-1</sup>	0
				Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{\text{trans}}$	€·día <sup>-1</sup>	0
				Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{\text{trans}}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,00
				Coste consumo gasoil para calefacción digestor	$C_{\text{cons.gasóil}}$	€·m <sup>3</sup> agua trat.	0,000
				Coste compra/venta residuo	$C_{\text{trans}}$	€·día <sup>-1</sup>	0
				Coste compra/venta residuo	$C_{\text{trans}}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,058
				<b>COSTE TOTAL cuando precio aditivo=0</b>	$C_{\text{TOTAL}}$	€·m <sup>3</sup> agua trat.	<b>0,036</b>

ANEXO 4: Simulaciones del proceso de digestión anaerobia en semicontinuo con el uso de residuo industrial.



**Tabla A.4.1.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con lodo mixto (Primera parte).

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	Q <sub>A</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	78.500	Carga orgánica aportada por lodo mixto	OLR <sub>1</sub>	kg <sub>sv</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,84
Concentración de ST en lodo mixto	[ST] <sub>1</sub>	% (p/v)	5,2	Caudal aportado por lodo mixto	Q <sub>1</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	350
Concentración de SV en lodo mixto	[SV] <sub>1</sub>	% (p/v)	3,2	Carga orgánica aportada por substrato 2	OLR <sub>2</sub>	kg <sub>sv</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Caudal másico de lodo mixto	M <sub>1</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	350.000	Caudal aportado por substrato 2	Q <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Densidad de lodo mixto	ρ <sub>1</sub>	g/ml	1,0	Carga orgánica aportada por substrato 3	OLR <sub>3</sub>	kg <sub>sv</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de ST en substrato 2	[ST] <sub>2</sub>	% (p/v)	0	Caudal aportado por substrato 3	Q <sub>3</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	0
Concentración de SV en substrato 2	[SV] <sub>2</sub>	% (p/v)	0	Caudal total de lodo a digestión (1 solo digestor)	Q <sub>D</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	350
Caudal másico de substrato 2	M <sub>2</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	0	Carga orgánica total a digestión	OLR <sub>D</sub>	kg <sub>sv</sub> ·m <sup>-3</sup> ·día <sup>-1</sup>	1,84
Densidad de substrato 2	ρ <sub>2</sub>	g/ml	1	Concentración de ST a digestión	[ST] <sub>D</sub>	% (p/v)	5,2
Concentración de ST en substrato 3	[ST] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión	[SV] <sub>D</sub>	% (p/v)	3,2
Concentración de SV en substrato 3	[SV] <sub>3</sub>	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	% <sub>sv</sub>	%	61,54
Caudal másico de substrato 3	M <sub>3</sub>	kg·día <sup>-1</sup>	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	q <sub>h,D1</sub>	día	17,4
Densidad de substrato 3	ρ <sub>3</sub>	g/ml	1				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	V <sub>D,útil</sub>	m <sup>3</sup>	6100	Producción diaria de biogás	V <sub>gas</sub>	Nm <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	2.444
BMP lodo mixto	BMP <sub>1</sub>	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ·kg <sub>sv</sub> alim <sup>-1</sup>	0,12	Caudal de lodo salida digestor	Q <sub>SD</sub>	m <sup>3</sup> ·día <sup>-1</sup>	350
BMP Substrato 2	BMP <sub>2</sub>	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ·kg <sub>sv</sub> alim <sup>-1</sup>	0	Concentración de ST en salida digestor	[ST] <sub>SD</sub>	% (p/v)	3,8
BMP Substrato 3	BMP <sub>3</sub>	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ·kg <sub>sv</sub> alim <sup>-1</sup>	0	Concentración de SV en salida digestor	[SV] <sub>SD</sub>	% (p/v)	1,8
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	%CH <sub>4</sub>	%	55	% Materia volátil en lodo digerido	% <sub>ssv</sub>	%	46,81

**Tabla A.4.1.- Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con lodo mixto (Segunda parte).**

% Reducción de SV en digestión	%R <sub>SV</sub>	%	45	Sólidos volátiles eliminados en digestión	SV <sub>elim</sub>	kg sv·día <sup>-1</sup>	5.040
<b>SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)</b>				<b>CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)</b>			
<b>Definición</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>	<b>Definición</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>
<b>Porcentaje de biogás a caldera (resto de cogeneración)</b>	-	%	<b>71</b>	Producción diaria de biogás a 35°C	V <sub>gas total</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·día <sup>-1</sup>	2.444
Calor específico del lodo	Ce <sub>lodo</sub>	kcal·m <sup>-3</sup> ·°C <sup>-1</sup>	1.000	Producción horaria total de biogás	V <sub>gas total</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	102
Temperatura del lodo espesado	T <sub>F</sub>	°C	15	Biogás a caldera	V <sub>gas caldera</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·día <sup>-1</sup>	1.746
Temperatura de digestión	T <sub>D</sub>	°C	35	Producción horaria de biogás a 35°C a caldera	V <sub>gas</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	73
Factor eficiencia intercambiador	η <sub>INT caldera</sub>	-	0,9	Producción horaria de biogás (potencia) a caldera	Pot <sub>v, gas</sub>	Kw	422
Temperatura lodo fresco entrada a inter. caldera	T <sub>Fe</sub>	°C	35	Calor necesario para calentar el lodo de T <sub>F</sub> a T <sub>D</sub>	q <sub>F</sub>	kcal·h <sup>-1</sup>	291.667
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	T <sub>Fs</sub>	°C	36	Pérdidas de calor	q <sub>INT</sub>	kcal·h <sup>-1</sup>	36.049
Temperatura agua entrada intercambiador	T <sub>We</sub>	°C	75	Calor total a aportar en el intercambiador	q <sub>INT</sub>	kcal·h <sup>-1</sup>	364.128
Rendimiento de combustión del biogás	η <sub>CH4</sub>	-	0,85	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	Q <sub>gas, cal</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	72,75
				Caudal de biogás excedente	Q <sub>gas, exd</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	0,00
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	% <sub>gas</sub>	%	81,16

**Tabla A.4.1.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con lodo mixto (Tercera parte).

SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)							
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)			
Porcentaje de biogás a cogeneración	-	%	29	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Producción anual de biogás	Pot <sub>v, gas</sub>	Nm <sup>3</sup> ·año <sup>-1</sup>	891.927	Energía generada contenida en el biogás total	E <sub>elec</sub>	kWh·año <sup>-1</sup>	5.178.133
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	η <sub>elec</sub>	%	40	Energía generada contenida en el biogás a cogeneración	E <sub>elec, cog</sub>	kWh·año <sup>-1</sup>	1.478.272
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	η <sub>term</sub>	%	42	Potencia total generada en cogeneración	Pot <sub>cog</sub>	kW	169
% Pérdidas cogeneración	η <sub>perd</sub>	%	18	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	Pot <sub>elec, cog</sub>	kW	68
Factor eficiencia intercambiador (0<η <sub>INT</sub> <1)	η <sub>INT, cog</sub>	-	0,9	Potencia térmica de cogeneración	Pot <sub>term, cog</sub>	kW	71
Horas de funcionamiento de la cogeneración	H <sub>cog</sub>	h·año <sup>-1</sup>	8.760	Energía térmica generada en cogeneración	q <sub>cog</sub>	kcal·h <sup>-1</sup>	61.042
				Calor aportado en el intercambiador en cogeneración	q <sub>INT</sub>	kcal·h <sup>-1</sup>	54.937
				Caudal biogás en cogeneración para calefacción	Q <sub>gas, cog</sub>	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	9,89
DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)							
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)			
%Materia seca lodos deshidratados	%MS <sub>l, des</sub>	%	20	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Precio gestión lodos deshidratados	P <sub>gest, lod</sub>	€/Tm	18	Sólidos totales salida digestión (suma 3 digestores)	SST <sub>SD</sub>	kg <sub>ST</sub> ·día <sup>-1</sup>	39.480
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	C <sub>elec, bruto</sub>	kWh·día <sup>-1</sup>	37.000	Cantidad de lodos a gestionar	G <sub>lodos</sub>	Tm/día	197,4
Precio energía eléctrica	P <sub>elec</sub>	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	C <sub>gest, lodo</sub>	€/día	3.553
				Coste gestión lodos	C <sub>gest, lodo</sub>	€/m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,045
				Energía eléctrica generada en cogeneración (S3D)	E <sub>elec, cog</sub>	kWh·día <sup>-1</sup>	4.860
				Consumo eléctrico neto EDAR	C <sub>elec, neto</sub>	kWh·día <sup>-1</sup>	32.140

**Tabla A.4.1.-** Simulación del proceso de digestión anaerobia en la EDAR B con lodo mixto (Cuarta parte).

	% Autoconsumo eléctrico	%AC <sub>elec</sub>	%	13,14
	Coste consumo eléctrico	C <sub>cons,elec</sub>	€·día <sup>-1</sup>	3.053
	Coste consumo eléctrico	C <sub>cons,elec</sub>	€·m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	0,039
	Coste total (consumo eléctrico + gestión lodos)	C <sub>TOTAL</sub>	€·m <sup>3</sup> <sub>agua trat.</sub>	<b>0,084</b>

**Tabla A.4.2.- Simulación del proceso de digestión anaerobia con residuo industrial en la EDAR B (Primera parte).**

ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR				ALIMENTACIÓN AL DIGESTOR			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Caudal de agua residual tratado	$Q_A$	$m^3 \cdot día^{-1}$	78.500	Carga orgánica aportada por lodo mixto	$OLR_1$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	1,84
Concentración de ST en lodo mixto	$[ST]_1$	% (p/v)	5,2	Caudal aportado por lodo mixto	$Q_1$	$m^3 \cdot día^{-1}$	350
Concentración de SV en lodo mixto	$[SV]_1$	% (p/v)	3,2	Carga orgánica aportada por residuo industrial	$OLR_2$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0,16
Caudal másico de lodo mixto	$M_1$	$kg \cdot día^{-1}$	350.000	Caudal aportado por residuo industrial	$Q_2$	$m^3 \cdot día^{-1}$	5
Densidad de lodo mixto	$\rho_1$	g/ml	1,0	Carga orgánica aportada por aditivo	$OLR_3$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	0
Concentración de ST en residuo industrial	$[ST]_2$	% (p/v)	19,5	Caudal aportado por aditivo	$Q_3$	$m^3 \cdot día^{-1}$	0
Concentración de SV en residuo industrial	$[SV]_2$	% (p/v)	19,0	Caudal total de lodo a digestión (1 solo digestor)	$Q_D$	$m^3 \cdot día^{-1}$	355
Caudal másico de residuo industrial	$M_2$	$kg \cdot día^{-1}$	5.000	Carga orgánica total a digestión	$OLR_D$	$kg_{SV} \cdot m^{-3} \cdot día^{-1}$	1,99
Densidad de residuo industrial	$\rho_2$	g/ml	1,0	Concentración de ST a digestión (incluido RI)	$[ST]_D$	% (p/v)	5,4
Concentración de ST en aditivo	$[ST]_3$	% (p/v)	0	Concentración de SV a digestión (incluido RI)	$[SV]_D$	% (p/v)	3,4
Concentración de SV en aditivo	$[SV]_3$	% (p/v)	0	% Materia volátil a digestión	$\%_{SV}$	%	63,38
Caudal másico de aditivo	$M_3$	$kg \cdot día^{-1}$	0	Tiempo de retención hidráulico en digestión	$q_{h,D1}$	día	17,2
Densidad de aditivo	$\rho_3$	g/ml	1				
PROCESO DE DIGESTIÓN				PROCESO DE DIGESTIÓN			
Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores	Definición variable	Símbolo	Unidades	Valores
Volumen útil digestor	$V_{D,útil}$	$m^3$	6100	Producción diaria de biogás	$V_{gas}$	$Nm^3 \cdot día^{-1}$	2.876
BMP Lodo mixto	$BMP_1$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SV_{alim}}^{-1}$	0,12	Caudal de lodo salida digestor	$Q_{SD}$	$m^3 \cdot día^{-1}$	355
BMP Residuo industrial (RI)	$BMP_2$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SV_{alim}}^{-1}$	0,25	Concentración de ST en salida digestor	$[ST]_{SD}$	% (p/v)	3,7
BMP Aditivo (NADA)	$BMP_3$	$Nm^3_{CH_4} \cdot kg_{SV_{alim}}^{-1}$	0	Concentración de SV en salida digestor	$[SV]_{SD}$	% (p/v)	1,7
%CH <sub>4</sub> en mezcla biogás generado	$\%CH_4$	%	55	% Materia volátil en lodo digerido	$\%_{SSV}$	%	46,88
% Reducción de SV en digestión	$\%R_{SV}$	%	49	Sólidos volátiles eliminados en digestión	$SV_{elim}$	$kg_{SV} \cdot día^{-1}$	5.954
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (caldera)				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (caldera)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Calor específico del lodo	$Ce_{lodo}$	$kcal \cdot m^{-3} \cdot ^\circ C^{-1}$	1.000	Producción diaria de biogás a 35°C	$V_{gas}$	$(Nm^3) \cdot día^{-1}$	2.876
Temperatura del lodo espesado	$T_F$	°C	15	Producción horaria de biogás a 35°C	$V_{gas}$	$(Nm^3) \cdot h^{-1}$	120

**Tabla A.4.2.- Simulación del proceso de digestión anaerobia con residuo industrial en la EDAR B (Segunda parte).**

Temperatura de digestión	$T_D$	°C	35	Producción horaria de biogás (potencia)	$Pot_{V, gas}$	Kw	696
Factor eficiencia intercambiador caldera	$\eta_{INT \text{ caldera}}$	-	0,9	Calor necesario para calentar el lodo de $T_F$ a $T_D$	$q_F$	kcal·h <sup>-1</sup>	295.833
Temperatura lodo fresco entrada a inter. caldera	$T_{Fe}$	°C	35	Pérdidas de calor	$q_{INT}$	kcal·h <sup>-1</sup>	36.564
Temperatura lodo fresco salida inter. caldera	$T_{Fs}$	°C	36	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	kcal·h <sup>-1</sup>	369.330
Temperatura agua entrada intercambiador	$T_{We}$	°C	75	Incremento de temperatura medio logarítmico	$\Delta T_{in}$	°C	35,38
Temperatura agua salida inter. caldera	$T_{Ws}$	°C	67	Superficie de intercambio necesaria	$S_{INT}$	m <sup>2</sup>	22,69
Coef. transf. calor material inter. caldera	$U_T$	kcal·h <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ·°C <sup>-1</sup>	460	Caudal de agua caliente necesario	$Q_W$	m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	46,17
Sobredimensionamiento capacidad de caldera	$\eta_{CAL}$	%	25	Capacidad necesaria de calderas	$Q_{CAL}$	kcal·h <sup>-1</sup>	415.496
Poder calorífico del biogás (65% de CH <sub>4</sub> )	$PCI_{CH_4}$	kcal·m <sup>-3</sup>	5.000	Caudal biogás necesario en caldera para calefacción	$Q_{gas, cal}$	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	86,90
Rendimiento de combustión del biogás	$\eta_{CH_4}$	-	0,85	Caudal de biogás excedente	$Q_{gas, exd}$	(Nm <sup>3</sup> )·h <sup>-1</sup>	32,94
				Porcentaje de biogás utilizado para calefacción	$\%_{gas}$	%	72,51

**Tabla A.4.2.- Simulación del proceso de digestión anaerobia con residuo industrial en la EDAR B (Tercera parte).**

				CALEFACCIÓN del DIGESTOR (cogeneración)			
SISTEMA DE CALEFACCIÓN DEL DIGESTOR (cogeneración)				Definición	Símbolo	Unidades	Valores
Definición	Símbolo	Unidades	Valores				
				Energía generada contenida en el biogas	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot año^{-1}$	6.094.613
Producción anual de biogás	$Pot_{V, gas}$	$Nm^3 \cdot año^{-1}$	1.049.790	Potencia total generada en cogeneración	$Pot_{cog}$	kW	813
Rendimiento eléctrico del sistema de cogeneración	$\eta_{elec}$	%	40	Potencia eléctrica de cogeneración (pot. instalada)	$Pot_{elec,cog}$	kW	325
Rendimiento térmico del sistema de cogeneración	$\eta_{term}$	%	42	Potencia térmica de cogeneración	$Pot_{term,cog}$	kW	341
% Pérdidas cogeneración	$\eta_{perd}$	%	18	Energía térmica generada en cogeneración	$q_{cog}$	$kcal \cdot h^{-1}$	293.941
Factor eficiencia intercambiador ( $0 < \eta_{INT} < 1$ )	$\eta_{INT,cog}$	-	0,9	Calor a aportar en el intercambiador	$q_{INT}$	$kcal \cdot h^{-1}$	410.367
Horas de funcionamiento de la cogeneración	$H_{cog}$	$h \cdot año^{-1}$	7.500	Porcentaje calor generado necesario para calefacción	$\%q_{aprov}$	%	139,61
DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO				DATOS ECONÓMICOS SISTEMA COMPLETO (digestión)			
Definición	Símbolo	Unidades	Valores	Definición	Símbolo	Unidades	Valores
%Materia seca lodos deshidratados	$\%MS_{l,des}$	%	20	Sólidos totales salida digestión (suma 3 digestores)	$SST_{SD}$	$kg_{ST} \cdot día^{-1}$	39.656
Precio gestión lodos deshidratados	$P_{gest,lod}$	€/Tm	18	Cantidad de lodos a gestionar	$G_{lodos}$	Tm/día	198,3
Consumo eléctrico bruto medio EDAR	$C_{elec,bruto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	37.000	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/día	3.569
Precio energía eléctrica	$P_{elec}$	€/kWh	0,095	Coste gestión lodos	$C_{gest,lodo}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,045
Distancia transporte de residuos	Dist	$km \cdot día^{-1}$	0	Energía eléctrica generada en cogeneración (S3D)	$E_{elec,cog}$	$kWh \cdot día^{-1}$	20.037
Coste transporte 1 (referido a kms)	$C_{trans,1}$	€/km <sup>-1</sup>	0,00	Consumo eléctrico neto EDAR	$C_{elec,neto}$	$kWh \cdot día^{-1}$	16.963
Coste transporte 2 (referido a peso transportado)	$C_{trans,2}$	€/Tm <sup>-1</sup>	0,0	% Autoconsumo	$\%AC_{elec}$	%	54,15
Inversión estimada equipos pretratamiento	Inv	€	0	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/día <sup>-1</sup>	1.611
Periodo inversión	n	años	10,00	Coste consumo eléctrico	$C_{cons,elec}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,021
Interés inversión	i	-	0,10	Coste consumo eléctrico + gestión lodos	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	<b>0,066</b>
Poder calorífico gasoil	$PCI_{gasoil}$	$kcal \cdot L^{-1}$	8.330	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/día <sup>-1</sup>	0
Rendimiento caldera gasoil	$\eta_{CAL}$	-	0,90	Coste transporte residuos	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,000
Precio gasoil	$P_{gasoil}$	€/L <sup>-1</sup>	1,05	Cuota amortización	$C_{amort}$	-	0,163
Precio compra/venta residuo	$C_{residuo}$	€/Tm	<b>0,0</b>	Anualidad amortización	$C_{amort}$	€/año <sup>-1</sup>	0

**Tabla A.4.2.- Simulación del proceso de digestión anaerobia con residuo industrial en la EDAR B (Cuarta parte).**

	Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€/día <sup>-1</sup>	0
	Coste amortización equipos pretratamiento	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,0000
	Coste consumo gasoil para calefacción digestor	$C_{cons,gasóil}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,015
	Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€/día <sup>-1</sup>	0
	Coste compra/venta residuo	$C_{trans}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	0,000
	<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	<b>0,081</b>
	<b>COSTE TOTAL</b>	$C_{TOTAL}$	€/m <sup>3</sup> agua trat.	<b>0,057</b>

