



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Ambiental

**Tratamiento anaerobio de aguas residuales:
Arranque, operación y seguimiento en una
planta piloto a escala laboratorio**

Autor:

Gutiérrez Cordero, Marina

Tutor:

**Pérez Elvira, Sara
Departamento de Ingeniería
Química y Medio Ambiente**

Valladolid, Septiembre 2015

Máster en Ingeniería Ambiental

SARA PÉREZ ELVIRA, PROFESORA DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TECNOLOGÍA DEL MEDIO AMBIENTE DE LA UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

INFORMA:

QUE MARINA GUTIÉRREZ CORDERO HA REALIZADO BAJO SU DIRECCIÓN EL TRABAJO DE FIN DE MÁSTER TITULADO TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES: ARRANQUE, OPERACIÓN Y SEGUIMIENTO DE UNA PLANTA PILOTO A ESCALA LABORATORIO.

SARA PÉREZ ELVIRA

VALLADOLID, 10 DE SEPTIEMBRE DE 2015

REUNIDO EL TRIBUNAL DESIGNADO POR EL COMITÉ ACADÉMICO DEL MÁSTER DE INGENIERÍA AMBIENTAL PARA LA EVALUACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE MÁSTER, Y DESPUÉS DE ESTUDIAR LA MEMORIA Y ATENDER A LA DEFENSA DEL TRABAJO: TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES: ARRANQUE, OPERACIÓN Y SEGUIMIENTO DE UNA PLANTA PILOTO A ESCALA LABORATORIO, PRESENTADO POR LA ALUMNA MARINA GUTIÉRREZ CORDERO, DECIDIÓ OTORGARLE LA CALIFICACIÓN DE _____

EL PRESIDENTE

EL SECRETARIO

FDO:

FDO:

VOCAL

FDO:

Índice

1. Resumen.....	6
2. Introducción.....	6
3. Objetivos.....	7
4. Material y métodos.....	7
4.1 Equipo.....	7
4.1.1 Tanque agitado.....	9
4.1.2 Clarificador secundario.....	9
4.1.3 Reactor UASB.....	10
4.1.4 Separador de espuma.....	10
4.1.5 Tanques de medición.....	11
4.1.6 Bombas.....	11
4.1.7 Calentadores.....	12
4.1.8 Válvulas.....	13
4.2 Alimentación.....	15
4.3 Inoculo.....	18
4.3.1 Tanque agitado y clarificador secundario.....	18
4.3.2 Reactor UASB.....	22
4.4 Parámetros de seguimiento y control.....	24
5. Arranque de la planta, operación y seguimiento.....	29
5.1 Preparación de la planta piloto.....	29
5.2 Arranque de la planta piloto, tanque agitado y clarificador secundario.....	34
5.2.1 1º Arranque.....	34
5.2.2 2º Arranque.....	35
5.3.3 3º Arranque.....	36
5.3.4 4º Arranque.....	37
5.4 Operación y seguimiento.....	38

5.5 Arranque del reactor UASB.....	40
5.6 Operación y seguimiento tras el arranque del reactor UASB	42
6. Resultados y discusión.....	44
6.1 DQO	44
6.2 FOSTAC	48
6.3 pH	49
6.4 Alcalinidad.....	50
6.5 Biogás	51
6.6 Materia seca	53
6.7 Otros resultados	55
7. Conclusiones	56
8. Bibliografía.....	58
9. Anexos	59

1. Resumen

Mediante un tratamiento anaerobio, en una planta piloto, se tratará un agua residual artificial creada en laboratorio. En este proceso es necesario realizar el arranque de la planta, proceso dificultoso debido a los numerosos parámetros que hay que tener en cuenta para que esto funcione. Una vez se consiguen unas condiciones estables es necesario controlar esta estabilidad, por ello se toman muestras para analizar diferentes parámetros y si es necesario modificarlos y ver cómo reacciona la planta con el objetivo de mantenerla estable con una buena degradación de la materia orgánica y su correspondiente producción de biogás.

2. Introducción

El tratamiento anaerobio del agua, consiste en la degradación de la materia orgánica de ésta, mediante una degradación biológica anaerobia.

Además de la degradación del agua, se puede obtener biogás, siendo el principal elemento de éste el metano junto con otros gases.

Para conseguir esta degradación, se producen una serie de etapas:

- Hidrolización de la materia orgánica y de las bacterias que forman el fango del reactor anaerobio.
- Acidogénesis de azúcares y aminoácidos dando ácidos grasos volátiles, de esta forma el reactor se acidifica, y esto produce que el p H sea un parámetro limitante ya que tiene que estar en condiciones neutras.
- Acetogénesis, proceso del que se obtiene ácido acético e hidrógeno
- Metanogénesis, en la que se obtiene metano gracias a procesos biológicos que realizan las bacterias, existen dos tipos de bacterias, las *Acetoclásticas* que se encargan del ácido acético, lo degradan y esto da lugar a metano. Y las *Hidrogenotrófas*, estas con dióxido de carbono e hidrógeno dan lugar a metano y oxígeno.

Mediante este proceso en el siguiente trabajo se explica lo ocurrido con una planta piloto anaerobia, compuesta de un tanque anaerobio agitado, un sedimentador y un reactor UASB.

Esta planta fue inoculada con fango procedente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Wolfenbüttel (Alemania) en el caso del tanque agitado, para el reactor UASB se utilizó fango procedente de una empresa embotelladora de agua.

Se trata la planta desde el arranque, hasta la operación estable de todas las partes de ésta, y para ello se alimentaba con un agua residual artificial creada en el laboratorio.

Se analizaron diferentes parámetros de la planta, para intentar encontrar unas condiciones estables y saber los parámetros que influyen en el proceso, y esto ha sido discutido en los posteriores resultados.

3. Objetivos

El principal objetivo del experimento es producir unas condiciones estables de operación en una planta piloto, formada por un tanque anaerobio agitado seguido de un sedimentador y un reactor anaerobio UASB. Para conseguir esto, debería ser posible alcanzar una frecuente degradación, lo que supone una disminución en el valor de DQO.

Otro objetivo del experimento es estudiar la influencia de parámetros importantes en el proceso. Por ejemplo:

- Temperatura en los reactores
- pH en los reactores
- Carga volumétrica
- Carga de fango

Otros objetivos del experimento son los siguientes:

- Conocimiento del tratamiento anaerobio del agua
- Efectos que producen la temperatura y el pH en la degradación anaerobia
- Funciones principales del reactor UASB
- Monitorizar y optimizar las condiciones de operación
- Identificación de la influencia de la carga de fango, carga volumétrica y velocidad de flujo en el reactor UASB

4. Material y métodos

4.1 Equipo

Para este trabajo, se ha utilizado un equipo CE 702, para el tratamiento anaerobio de agua.

Este reactor, consta de dos unidades principales:

- Tanque agitado con clarificador secundario
- Reactor UASB

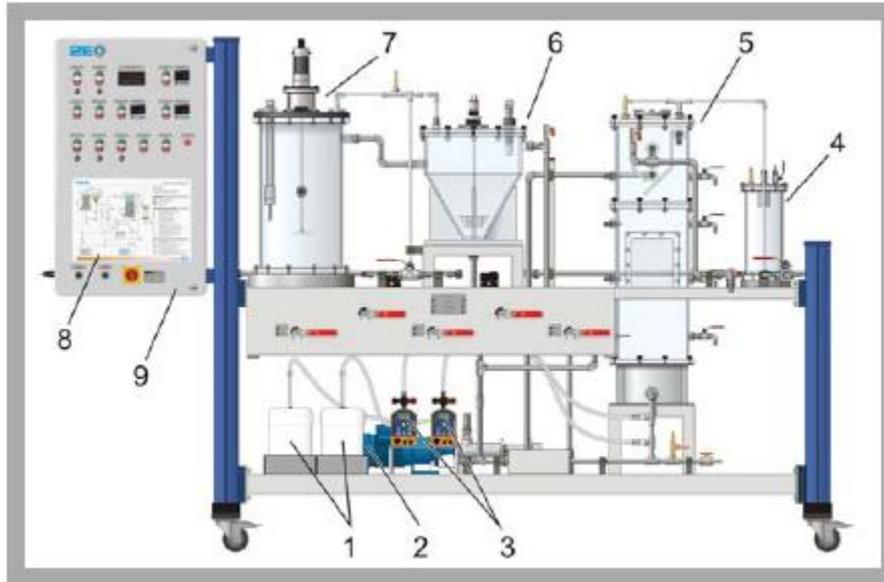


Ilustración 1. Equipo CE 702.

1. Tanques para químicos, 2. Bomba de circulación, 3. Bombas de medida, 4. Separador de espuma, 5. UASB reactor, 6. Clarificador secundario, 7. Tanque agitado, 8. Esquema del proceso, 9. Cabina.

El agua residual es transportada al tanque agitado, en este tanque los microorganismos anaerobios degradan las largas cadenas orgánicas en cadenas más cortas. En el clarificador secundario la biomasa del tanque agitado es separada del agua, esta biomasa es bombeada de vuelta al tanque agitado.

El agua residual pre tratada, va hacia el reactor UASB, aquí tiene lugar el último paso de la degradación anaerobia. Las sustancias de cadenas cortas son convertidas por los microorganismos en biogás. El flujo se desplaza desde el fondo hacia arriba, en esta parte de arriba, el reactor tiene un sistema de separación que separa el gas generado del agua tratada.

Por último el agua tratada es recolectada en un tanque. Desde el reactor UASB el agua puede ser recirculada para ajustar la velocidad de flujo.

Las temperaturas en el tanque agitado y en el reactor UASB pueden ser controladas, el pH se mide para el tanque agitado y para el reactor UASB y también puede ser controlado.

Se requieren análisis tecnológicos y biomasa anaerobia para el adecuado desarrollo de éste tratamiento. Por tanto, el experimento requiere un laboratorio con los siguientes requerimientos:

- Conexión de agua
- Salida de agua
- Capacidad para recoger el biogás resultante
- Capacidad para filtrar el agua residual de las muestras
- Capacidad para determinar el contenido de materia seca
- Equipo para determinar parámetros del agua residual, como: Demanda química de Oxígeno, Alcalinidad, pH...

Las siguientes sustancias son requeridas para el experimento:

- Biomasa, fango del digester de una Planta de Tratamiento de Agua Residual para el tanque agitado y fango de pellets de un reactor UASB.
- Sustancias para agua residual artificial
- Soluciones ácidas y básicas, HCl y NaOH requeridos para el control del nivel de pH

4.1.1 Tanque agitado

Este tanque es cilíndrico y tiene un volumen de 30 L. La alimentación del tanque agitado se encuentra en la base del reactor (1), la salida se localiza en el lado derecho (3). La máquina de agitación (6), mezcla el contenido del reactor.

El calentador H1, se encuentra en la base, el sensor de temperatura se encuentra en el centro del reactor (2). El sensor de pH (8), está integrado en un soporte (7). En la cabina de mandos podemos poner la temperatura deseada para que el calentador incremente o disminuya, con la intención de conseguir la temperatura que queremos dentro del reactor.

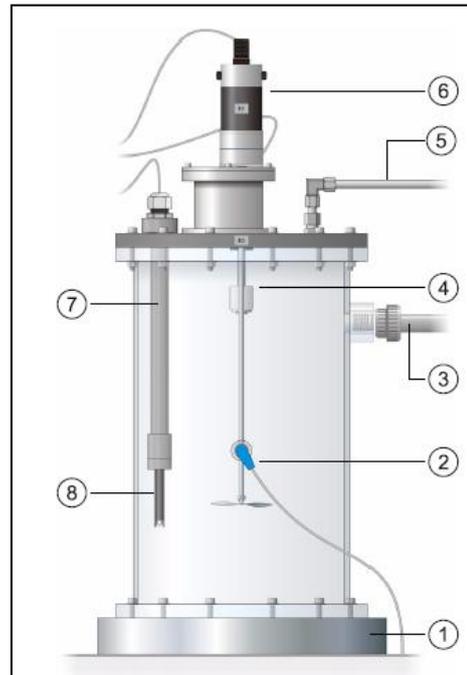


Ilustración 2. Tanque agitado

El reactor consta de un interruptor de nivel (4), este interruptor es parte del monitoreo del sistema de nivel. El gas generado en este tanque es transportado por un camino diferente (5).

4.1.2 Clarificador secundario

La biomasa descargada del tanque agitado se sedimenta en este clarificador secundario. La entrada al sedimentador (7) se localiza en el lado izquierdo. El fango sedimentado se colecta en el embudo (1). El agua clarificada continua el proceso dejando el sedimentador (2).

La recirculación del fango a través de la bomba P2, se dirige de vuelta al tanque agitado. Esto puede ocasionar la formación de un canal en la cama de lodo. Por ello, el sedimentador consta de un agitador que gira lentamente

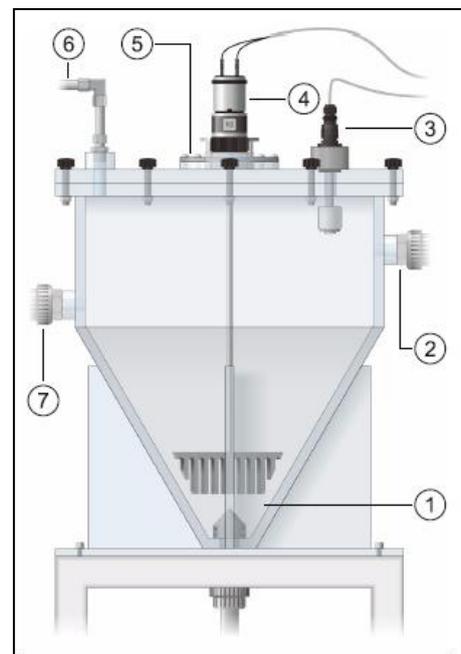


Ilustración 3. Clarificador secundario

(4), así la cama de lodo puede ser homogenizada lo que se necesite.

Posee también, un interruptor de nivel (3), que forma parte del sistema de monitoreo. El gas generado en esta operación es dirigido por una línea separada. (6)

4.1.3 Reactor UASB

Este tanque tiene un volumen de 50 L. La alimentación del reactor UASB se localiza en la base de éste (1), el flujo fluye verticalmente hasta la parte de arriba.

Consta de un sistema de separación (4) en la parte de arriba, para separar el gas producido durante la operación. También hace que la biomasa permanezca en el reactor.

El calentador H2 está construido en la base, el sensor de temperatura (10) en la parte final del reactor. El reactor tiene dos interruptores de nivel (3 y 7).

Hay tres conexiones para sensores (9) en un lado de reactor, las conexiones pueden ser usadas individualmente para otros sensores.

El gas generado es llevado a un separador de espuma por una línea separada (6), para prevenir que la presión sea muy alta, existe una válvula de seguridad V19 (8) en la tapa del reactor.

Encontramos dos paneles de inspección (3 y 7) para limpiar el reactor.

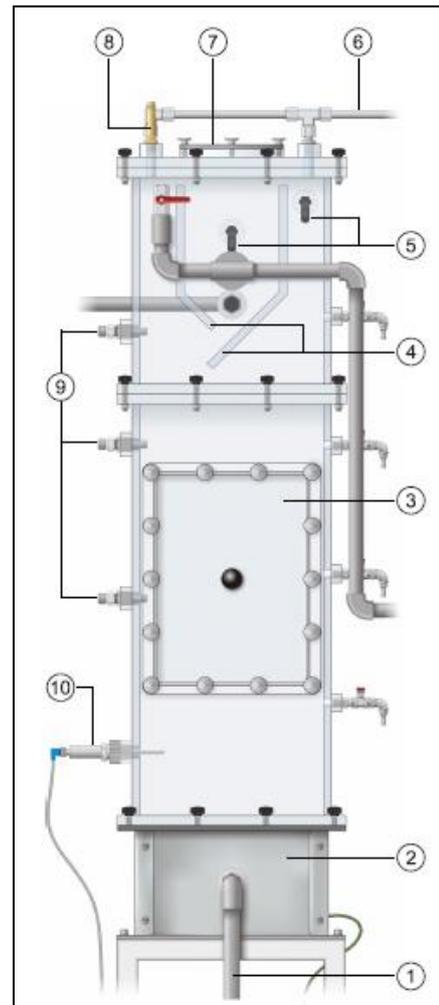


Ilustración 4. Reactor UASB

4.1.4 Separador de espuma

La formación de espuma en el compartimento de gas del reactor UASB puede ser grave, el gas es llevado al separador de espuma para separar la espuma del gas.

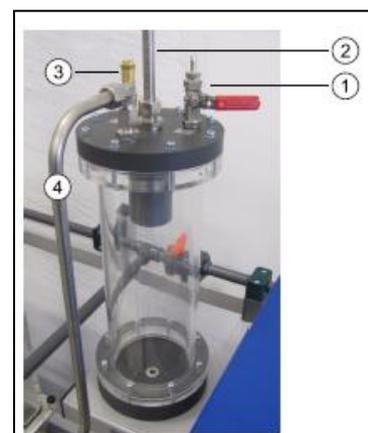


Ilustración 5. Separador de espuma

El gas entra al separador (2) por arriba con la espuma, la espuma es retenida en el tanque. El gas limpio va hacia la salida (4), dejando el separador.

También tenemos una válvula de seguridad V31 (3) por si la presión es demasiado alta. La válvula V30 (2) se localiza en la tapa para permitir tomar muestras de gas.

4.1.5 Tanques de medición

Estos dos tanques B5 y B6 actúan como tanques receptores de dos bombas de medida P3 y P4.

Se trata de un tanque con ácido, bomba P3 y un tanque de solución básica, bomba P4.



Ilustración 6. Tanques de medición

4.1.6 Bombas

- **Bomba del agua residual P1**, la bomba del agua residual está localizada en la unidad de suministro y bombea el agua hasta el tanque agitado. Es una bomba peristáltica, y su velocidad puede ser ajustada.

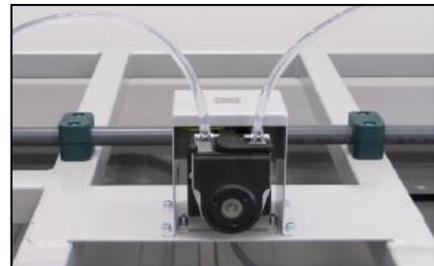


Ilustración 7. Bomba P1

- **Bomba de recirculación del fango P2**, está localizada entre el tanque agitado y el clarificador secundario. Esta bomba se alimenta del fango sedimentado en el sedimentador secundario y lo devuelve al tanque agitado. Es peristáltica y la velocidad puede ser ajustada también.



Ilustración 8. Bomba P2

- **Bombas de medición P3 y P4**, estas dos bombas suministran soluciones ácidas o básicas para el reactor UASB. Estas bombas actúan como controladores del pH en el reactor.



Ilustración 9. Bombas P3, P4

- **Bomba de circulación P5**, esta bomba hace que el agua circule dentro del reactor UASB. La circulación de la bomba es una bomba de tornillo excéntrico. La velocidad de la bomba puede ser ajustada, esto hace posible ajustar el flujo de velocidad en el reactor UASB.



Ilustración 10. Bomba P5

- **Bomba de alimentación al reactor UASB P6**, esta bomba suministra el agua desde el clarificador secundario al reactor UASB, es peristáltica.



Ilustración 11. Bomba P6

- **Bomba del agua tratada P7**, esta bomba suministra el agua desde el reactor UASB a la unidad de suministro. Es una bomba peristáltica.



Ilustración 12. Bomba P7

4.1.7 Calentadores

- **Calentador H1**, este calentador está construido en la parte de abajo del tanque agitado.
- **Calentador H2**, construido en la parte de abajo del reactor UASB.
- **Calentador H3**, localizado en la línea de alimentación del reactor UASB. Este calentador asiste al calentador H2 cuando calienta el reactor UASB.

4.1.8 Válvulas

- **Válvulas de desagüe V1, V2**, en el tanque de agua residual y el tanque de agua tratada.
- **Válvula V3**, la bomba P7 suministra el agua tratada desde el reactor UASB a la unidad de suministro. Puede ser usada para alimentar el agua tratada al tanque de agua residual o al tanque de agua tratada.
- **Válvulas V4, V7 y V15**, localizadas en la parte frontal, tienen la función de determinar los caudales a través de medidas volumétricas y tomar muestras. En condiciones normales, deben encontrarse en posición horizontal. Para medidas volumétricas y tomar muestras deben ser giradas en posición vertical.

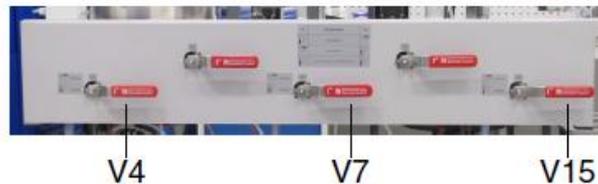


Ilustración 13. V4, V7 y V15

- **Válvulas V5, V14**, localizadas en la figura anterior, en la parte frontal, son usadas para seleccionar diferentes modos de operación.
- **Válvula V21**, esta válvula es usada principalmente como punto de toma de muestras a la salida del reactor UASB.
- **Válvulas V10, V33**, localizadas en la línea de gas, cada válvula tiene dos conectores. El gas fluye por uno de los dos conectores dependiendo de la posición del mango. Por ello se debe colocar un dispositivo de medición de gas.
- **Válvulas de seguridad V9, V19, V31**, hay tres válvulas de seguridad en la línea de gas. La válvula V9 está localizada en la línea de gas que está compartida por el tanque agitado y el clarificador secundario. La válvula V19 está localizada en la cubierta del reactor UASB. El separador de espumas está también dotado con una válvula de seguridad V31. Estas válvulas previenen que la presión en la línea de gas sea demasiado alta. Disparan a una presión de 300 mbar.
- **Válvula de seguridad V27**, otra válvula de seguridad está localizada en la línea de alimentación del reactor UASB. Previene de una elevada presión en el tubo. Dispara a una presión de 6 bar.

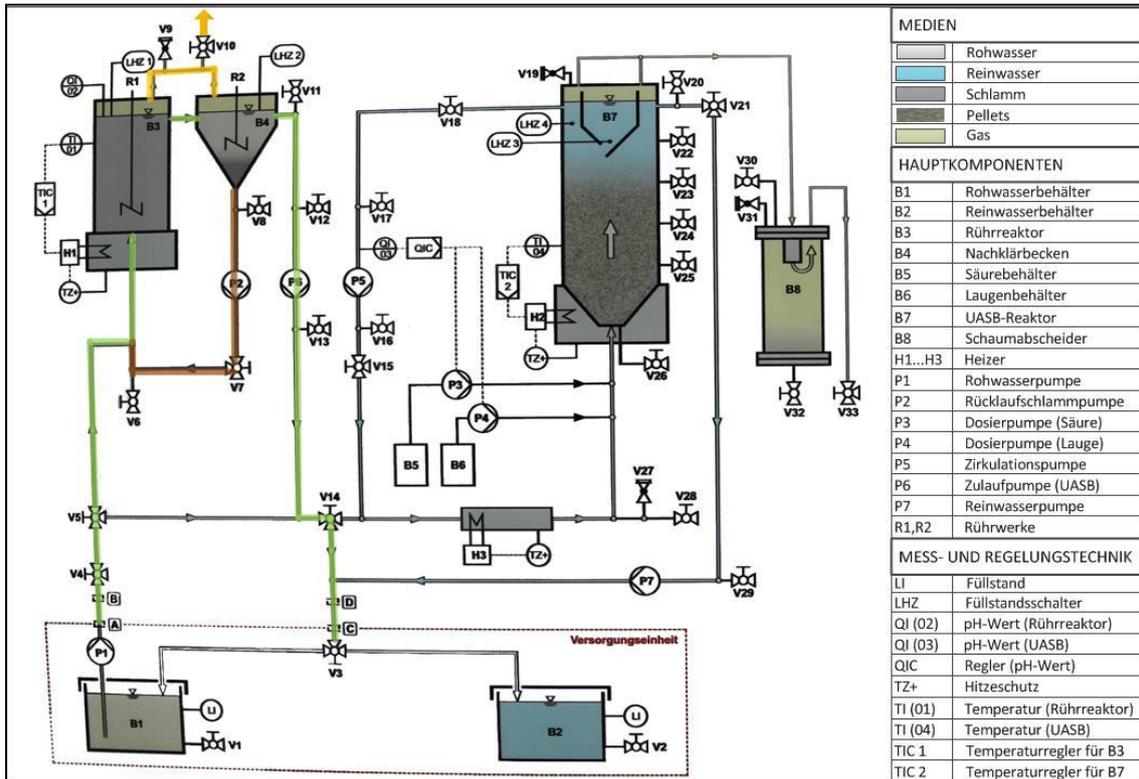


Ilustración 14. Esquema de la planta piloto

Datos técnicos:

- Tanque agitado: 30 L
- Clarificador secundario: 30 L
- Reactor UASB: 50 L
- Tanque para el agua residual: 180 L
- Tanque para el agua tratada: 180 L

Dimensiones y peso:

- L x W x H: 1550 x 790 x 1150 mm (Unidad de suministro)
- L x W x H: 2890 x 790 x 1900 mm (Equipo)
- Peso: aproximadamente 520 kg

Requerimientos de operación:

- 400 V, 50/60 Hz, 3 fases de 230 V, 60 Hz/CSA

- Conexión de agua, drenaje, fango de aguas residuales, pellets para el reactor UASB, sustancias para la preparación de agua residual artificial, soda cáustica, ácido clorhídrico.

La planta tiene una cabina de control desde la que se controlaron las bombas en funcionamiento y la velocidad de las bombas que tenían esta opción. Así como poder ver la temperatura que presentaban el tanque agitado y el reactor UASB y controlar la temperatura a la que queríamos que estos funcionaran.

Así mismo, controlamos la planta con un programa informático, desde el que podemos registrar diversos parámetros en cada momento.

4.2 Alimentación

Inicialmente, se pensó como alimentación para el equipo una mezcla entre agua residual procedente de la planta de tratamiento de Wolfenbüttel y agua residual artificial.

Se decidió que la mezcla final tuviera una DQO de 2500 mg/l, una carga alta, ya que el tratamiento anaerobio necesita este tipo de alimentación. El agua residual procedente de la planta de tratamiento oscila entre 400-700 mg/L, para realizar estimaciones, suponemos que el agua de la planta tiene una DQO de 650 mg/L, ya que es el valor más común que se suele encontrar en la planta, gracias a datos que nos proporcionó ésta.

Consideramos un caudal entre 3-7 l/h, y un tiempo de operación aproximado de un mes.

En la siguiente tabla, podemos ver los valores de los químicos requeridos para los diferentes tipos de mezcla entre ambos tipos de agua. Los químicos utilizados serán sacarosa, urea y K_2HPO_4 . Podemos ver también glucosa monohidratada como posible alternativa a la sacarosa.

Para estimar estos valores, utilizamos diferentes cálculos que se muestran después de la tabla.

Mezcla					
				Q	Q
				mg/h	mg/h
WW Planta	WW Artificial	Químicos	mg/l	3	7
50%	50%	Sacarosa	3566	5348	12480
		Glucosa monohidratada	4485	6727	15696
		Urea	77	116	270
		K ₂ HPO ₄	40	60	141
75%	25%	Sacarosa	6598	4949	11547
		Glucosa monohidratada	8299	6224	14523
		Urea	143	107	250
		K ₂ HPO ₄	75	56	130
25%	75%	Sacarosa	2555	5748	13412
		Glucosa monohidratada	3213	7229	16869
		Urea	55	124	290
		K ₂ HPO ₄	29	65	152
80%	20%	Sacarosa	8115	4869	11361
		Glucosa monohidratada	10206	6124	14289
		Urea	176	105	246
		K ₂ HPO ₄	92	55	128
99%	1%	Sacarosa	152172	4565	10652
		Glucosa monohidratada	191392	5742	13397
		Urea	3292	99	230
		K ₂ HPO ₄	1719	52	120

Tabla 1. Químicos para la mezcla de agua residual

Podemos ver en rojo que los valores más bajos son para la mezcla que tiene un 99% de agua de la planta de tratamiento y un 1% de agua residual. Esto es obvio ya que si utilizamos más agua procedente de la planta, tendremos que preparar menos agua artificial y por tanto gastaremos menos químicos.

Pero tenemos otro problema, la dificultad de transportar una gran cantidad de agua residual desde la planta de tratamiento hasta el laboratorio, por tanto y tras estudiar los diferentes porcentajes de mezcla posibles, finalmente decidimos usar solo agua residual artificial como alimentación para la planta piloto.

Para la preparación de agua residual artificial, es necesario seguir una serie de pasos:

- Determinar el valor de DQO del agua residual
- Determinar la concentración de sacarosa requerida
- Determinar la concentración de urea, sabiendo que la proporción DQO:N es aproximadamente 600:5
- Determinar la concentración de K₂HPO₄, sabiendo que la proporción DQO:N:P es aproximadamente 600:5:1

Como ya hemos dicho, inicialmente preparamos agua residual artificial para 2,5 g/l de DQO, por lo tanto mostraremos el ejemplo de los cálculos con este valor.

Para el aporte de sacarosa, utilizamos azúcar.

- Concentración de azúcar

$$C_{sa} = \frac{COD}{1,122 \frac{g O_2/mol}{g C_{12}H_{22}O_{11}/mol}}$$

$$C_{sa} = \frac{2,5 g O_2/L}{1,122 \frac{g O_2/mol}{g C_{12}H_{22}O_{11}/mol}}$$

$$C_{sa} = 2,28 g/L = 2280 mg/L$$

- Concentración de Urea

Para la proporción DQO:N de 600:5, el agua residual debe tener la siguiente concentración de nitrógeno:

$$CN = \frac{5 mg N/L}{600 mg O_2/L} \cdot COD$$

$$CN = \frac{5 mg N/L}{600 mg O_2/L} \cdot 2500 \frac{mg O_2}{L} = 20,83 mg/L$$

Si la urea es usada como fuente de nitrógeno, la concentración requerida se calcula de la siguiente manera:

$$C_u = \frac{100\%}{47\%} \cdot 20,83 \frac{mg}{L} = 42,55 mg/L$$

- Concentración de fósforo

$$C_p = \frac{1 \frac{mg P}{L}}{600 mg \frac{O_2}{L}} \cdot COD$$

$$C_p = \frac{1 \frac{mg P}{L}}{600 mg \frac{O_2}{L}} \cdot 2500 mg \frac{O_2}{L} = 4,16 \frac{mg}{L}$$

Usamos fosfato dipotásico como fuente de fósforo, éste contiene aproximadamente un 18% de fósforo. La concentración requerida es la siguiente:

$$C(K_2HPO_4) = \frac{100\%}{18\%} \cdot 4,16 \frac{mg}{L} = 23,11 mg/L$$

Tras los sucesivos arranques, se utilizaron diferentes concentraciones de DQO para el agua residual artificial, esto se explicará posteriormente. Para calcular los químicos necesarios se utilizaron los cálculos anteriores en todo momento.

En un primer momento, no se tuvo en cuenta la necesidad de incluir un químico que actuara como buffer, por tanto esto produjo problemas que se verán posteriormente.

Decidimos utilizar como buffer para el agua residual artificial, carbonato de sodio, éste se añadió en la misma cantidad que se utilizaba para el azúcar en la preparación del agua residual artificial. En los casos en los que se consideró necesario se agregó además esta solución en el contenedor de alimentación al tanque agitado, así como hidróxido de sodio, para incrementar el pH del agua que entraba al proceso.

4.3 Inoculo

4.3.1 Tanque agitado y clarificador secundario

Para este tanque utilizamos como inoculo, fango procedente del digestor de la planta de tratamiento de agua residual de Wolfenbüttel.

Esta planta de tratamiento recibe aproximadamente 3,2 millones de m³ de aguas residuales que se transportan anualmente hasta la planta.



Ilustración 15. Sala dónde se extrajo el fango para el tanque agitado. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Wolfenbüttel

Este fango que se va a utilizar en el tanque agitado, necesita un pre tratamiento, ya que puede contener pequeñas partículas como granos de arena. Éstas podrían causar bloqueos en las bombas y tubos de la planta piloto. Por ello, este fango fue tamizado antes de introducirlo en el reactor, se utilizaron tamices de laboratorio entre 0,5 y 1 mm.

Para calcular la cantidad de fango necesario que necesita el tanque agitado para su arranque, utilizamos en un primer momento los siguientes cálculos, siguiendo las instrucciones de la planta piloto.

Para ello antes debemos determinar los siguientes parámetros:

- Determinar la concentración de DQO en el agua residual
- Determinar el TRH (Tiempo de retención hidráulica del agua residual en el reactor)
- Calcular el caudal necesario
- Determinar la velocidad de la bomba P1 (la que bombea el agua desde el contenedor de agua residual al tanque agitado)
- Determinar la carga de lodo (Bds)
- Determinar la biomasa en el tanque agitado necesaria

$$Mds = \frac{Qw \cdot DQO}{Bds}$$

- Determinar el contenido de materia seca en el digestor
- Determinar la cantidad de lodo que debemos introducir en el tanque agitado

$$Vs = \frac{Mds}{DS}$$

En nuestro experimento, fueron necesarios cuatro arranques, (esto se explicará más adelante en profundidad) hasta que se lograron unas condiciones adecuadas para seguir operando, por tanto estos cálculos se realizaron varias veces.

Ejemplo, realizado en el primer intento:

- Seleccionamos la carga de DQO, en este caso 2500 mg/l
- Tiempo de retención hidráulica y caudal, en este caso escogimos un caudal de 3 l/h, y el volumen del tanque agitado es de 30 l por tanto, el TRH es de 10 horas.

$$TRH = \frac{V_{tanque}}{Q}$$

- Velocidad de la bomba P1, para calcular esta seguimos las instrucciones del manual, en el encontramos la gráfica que se muestra a continuación.

Raw water pum P1	
%	Q (l/h)
0	0
10	1,9
20	3,5
30	4,6
40	6,2
50	7,6
60	8,9
70	9,9
80	10,5
90	11,1
100	11,5

Tabla 2. Bomba del agua residual P1

Gracias a esta gráfica, podemos interpolar y encontrar el valor adecuado para el caudal escogido, es decir, 3 l/h. En este caso la velocidad para nuestro caudal es de 16,875%.

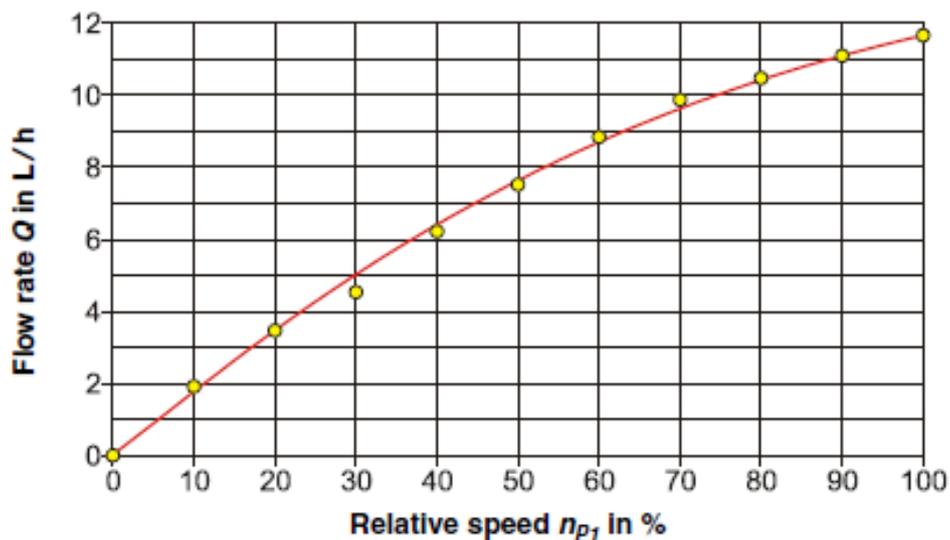


Ilustración 16. Velocidad relativa de P1 en %. Manual de la planta piloto

- Carga de lodo, en este caso el manual nos decía que tomáramos el valor de $Bds = 1,5 \text{ g DQO/g SD} \cdot \text{d}$, este valor también puede calcularse a través de la siguiente fórmula.

$$Bds = \frac{Bd_{qo}}{Mds}$$

$$Bds = \frac{Q_w \cdot DQO}{DS \cdot Vstr}$$

El manual nos decía que este valor tiene que estar comprendido entre 0,2 y 2,0 g DQO/g DS · d.

En nuestro caso, decidimos utilizar el valor seleccionado en el manual, es decir 1,5 g DQO/ g SD · d.

- Biomasa necesaria

$$M_{ds} = \frac{Q_w \cdot DQO}{B_{ds}}$$
$$M_{ds} = \frac{3 \frac{l}{h} \cdot 2,5 \text{ g } O_2/l}{1,5 \frac{\text{g DQO}}{\text{g DS} \cdot d}} \cdot 24 \text{ h/d}$$
$$M_{ds} = 120 \text{ g DS}$$

- Materia seca contenida en el fango, en un primer momento tomamos el dato que nos dieron de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, el valor era de 29 g DS/l.
- Cantidad de fango necesaria para el tanque agitado

$$V_s = \frac{M_{ds}}{DS}$$
$$V_s = \frac{120 \text{ g DS}}{29 \text{ g DS/l}}$$
$$V_s = 4,13 \text{ L de fango}$$

Se realizaron cuatro arranques de la planta piloto, en el segundo caso se volvió a utilizar esta misma cantidad de fango, en la tercera, se analizó en el laboratorio el contenido de materia seca, que fue de 24,17 g DS/l, por lo que el volumen de fango utilizado fue de 5,10 L.

En el cuarto y último arranque, siguiendo los consejos de personas especialistas en el tema, se decidió llenar el tanque con la máxima cantidad posible de fango, en este caso fueron 8 L de fango que quedaban en el frigorífico procedentes de la planta.

Una vez que sabemos la cantidad de fango que vamos a introducir en el tanque agitado, y éste es tamizado, se procede a introducirlo en el tanque agitado. Para ello, se utilizó un embudo como ayuda.



Ilustración 17. Introducción del fango al tanque agitado

Tras la introducción del fango, el resto del tanque se llenó con agua residual y el clarificador secundario con agua procedente del grifo siguiendo las indicaciones del manual. Se puso el calentador del tanque agitado a la temperatura de 38,2°C, ya que era la temperatura a la que se encontraba en la planta.



Ilustración 18. Tanque agitado y clarificador secundario preparado para el arranque

4.3.2 Reactor UASB

Para este reactor utilizamos como inculo fango procedente de una empresa de bebidas embotelladas, *WeserGold*, en la ciudad de Rinteln.



Ilustración 19. WeserGold, Rinteln

Este fango se encontraba a una temperatura de 27,2°C y un pH de 6,4. El personal de la empresa se encargó de llenarnos dos bidones que transportaríamos de nuevo a Wolfenbüttel.

La empresa nos dijo que el agua que entraba al digester presentaba una DQO de aproximadamente 2000 mg/l.



Ilustración 20. Extracción del fango del digester. WeserGold.

El arranque del reactor UASB se produjo cuando se lograron unas condiciones más o menos estables en el tanque agitado.

Siguiendo las indicaciones del manual, se llenó el reactor UASB con 40 L de fango, éste reactor recordemos que tiene un volumen de 50 L. El resto de éste se lleno con agua del grifo, es importante colocar una bolsa para el biogás que se genera en estos procesos.

En este reactor es importante controlar la DQO del agua que entra al tanque, por ello, se realizaron diferentes análisis para intentar introducir en este reactor una DQO lo más similar posible a las condiciones de la fábrica donde se obtuvo, es decir aproximadamente 2000 mg/l.

A pesar de que la temperatura en la fábrica del fango era de 27,2 se decidió elevar con el calentador del reactor UASB hasta 35°C aproximadamente, ya que es una temperatura óptima para este tipo de procesos.



Ilustración 21. Reactor UASB

4.4 Parámetros de seguimiento y control

Durante el arranque y seguimiento del reactor, se tomaron muestras diariamente del agua residual artificial y del efluente, cuando sólo se operó con el tanque agitado y clarificador secundario, se tomaba como efluente el agua obtenida tras el clarificador, una vez se inició el reactor UASB, se tomaron muestras tras el clarificador y después del reactor UASB.

También se tomaron muestras del biogás producido y muestras del fango utilizado tanto para el tanque agitado como para el reactor UASB.

En estas muestras se analizaron los siguientes parámetros:

- *Análisis de la Demanda Química de Oxígeno*

Para analizar la DQO de las muestras obtenidas, el método utilizado es el del dicromato, para ello utilizamos un test en el que se introducen 2 ml de la muestra (previamente filtrada) en una cubeta, y tras agitación manual se introduce en el termostato HT-200 durante 15 minutos a 170°C.

Cuando sacamos las cubetas del termostato es necesario agitarlas manualmente de nuevo y dejarlas enfriar a temperatura ambiente y que sedimenten las partículas.

Antes de someterlas a evaluación, deben ser limpiadas. Son introducidas en el fotómetro y obtenemos el valor de DQO de esa muestra.

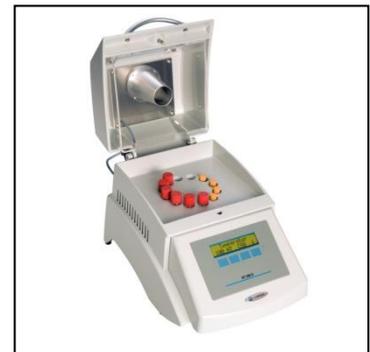


Ilustración 22. Termostato HT-200



Ilustración 23. Fotómetro

- *Análisis de Ácidos Grasos volátiles/Carbono inorgánico total (FOSTAC)*

Este análisis es un indicador para la evaluación del grado de los procesos de fermentación, el Carbono inorgánico total es una estimación de la capacidad buffer de la muestra y el análisis de ácidos grasos volátiles analiza el contenido de ácidos grasos.

Para realizar este análisis utilizamos muestras del fango tanto del tanque agitado como del reactor UASB, es necesario centrifugar una parte de la muestra durante 20 minutos a 1000 rpm.

Una vez centrifugado, se toman 5 ml de muestra centrifugada y se añaden hasta que sean 20 ml. Una vez tenemos esto, es necesario utilizar H₂SO₄ 0,1 N hasta ajustar el pH hasta 5, este valor debe ser anotado, posteriormente se ajusta hasta 4,4.

Con estos valores se realizan los siguientes cálculos.

$$\frac{VOA}{TAC} = \frac{VOA \left(\text{cantidad de H}_2\text{SO}_4 \text{ desde p H } 5,0 \text{ hasta } 4,4 \times \frac{1,66}{2,5} \times 10 \right) - 0,15 \times 500}{TAC \left(\text{cantidad de H}_2\text{SO}_4 \text{ desde p H } X \text{ hasta } 5,0 \times \frac{250}{2,5} \times 10 \right)}$$

VOA/TAC-Value	background	procedure
>0.6	plant heavily overfed	stop feeding
0.5-0.6	plant overfed	reduce feeding
0.4-0.5	plant heavily loaded	increase measuring
0.3-0.4	plant well-utilized	hold feeding
0.2-0.3	plant hungry	increase feeding slowly
<0.2	plant very hungry	increase feeding quick

Ilustración 24. VOA/TAC

Con el valor obtenido tras realizar estos cálculos, podemos dirigirnos a la tabla que se muestra en la parte superior para saber que debemos hacer en cuanto a la alimentación de la planta.

- *Análisis de pH*

Se realizaron numerosas mediciones de pH, para mantener controlado éste en el tanque de alimentación del agua residual, se utilizaba para ello un pH metro, que se

introducía en el tanque y se tomaba medida en numerosas ocasiones durante el día para tenerlo controlado.

El control de pH en la planta se registraba automáticamente.

- *Análisis de Alcalinidad*

La alcalinidad, capacidad para neutralizar ácidos, es la suma de todas las bases titulables, este análisis se realizó a las muestras de agua tanto del tanque de alimentación como del efluente diariamente.

Se calculó la alcalinidad total y la parcial, la total se calcula titulando hasta pH 4,30 y la parcial hasta pH 5,75, para realizar este análisis, se diluyeron las muestras hasta una relación 1:10, 5 ml de la muestra en 50 ml de agua destilada.

Colocamos la muestra diluida en agitación y añadimos H₂SO₄ 0,1 N hasta llegar al pH requerido y se anota el volumen de ácido utilizado para realizar después los cálculos correspondientes.

La alcalinidad se expresa en mg de CaCO₃ por litro.

$$mg\ CaCO_3 = \frac{(N \times V) \times 50000}{V_m}$$

N = Normalidad del H₂SO₄

V = Volumen en ml de ácido consumido hasta el valor de pH

V_m = Volumen en ml de la muestra

- *Temperatura*

La temperatura es un parámetro importante a controlar, gracias al software podemos saber la temperatura en cada momento tanto en el tanque agitado como en el reactor UASB.

Esto lo controlamos mediante el valor de referencia que introducimos en la cabina de la planta piloto.

- *Análisis del Biogás*

Para la medición de biogás se utilizaron bolsas para recoger el gas, como la que se muestra en la figura.

Estas bolsas una vez estaban llenas de biogás, se llevaban a analizar, tanto la composición del gas, como la cantidad en volumen de biogás obtenida.

La composición se analizaba con un medidor de biogás, que nos daba los valores en porcentaje o en ppm, según la cantidad del compuesto, de los elementos contenidos en el biogás de la bolsa.

Para analizar el volumen, se utilizaba una bomba que eliminaba el gas de la bolsa, hacia el exterior, y a su vez permitía contabilizar los litros de aire que abandonaban ésta bolsa, era necesaria una conexión mediante tubos para realizar la medición.



Ilustración 25. Bolsa de biogás

- *Análisis de la materia seca y contenido orgánico de la materia seca*

Para analizar estos parámetros se utilizaron muestras correspondientes al fango, tanto fresco como procedente del tanque agitado o del reactor UASB. Se analizaron en varias ocasiones de la siguiente manera.

El primer paso es pesar los crisoles y llenarlos, en nuestro caso se llenaron con 10 ml de fango en todos los análisis. Esto es pesado antes y después de llenarlos y posteriormente se introducen en el horno 48 horas a 105° C.



Ilustración 26. Desecador con crisoles

Una vez son pesados, y para definir la materia orgánica seca, los crisoles deben ser introducidos en una mufla a 550° C durante 6 horas. Antes de colocarlos de nuevo en

el desecador, la temperatura de los crisoles debería disminuir para posteriormente introducirlos en el desecador y ser pesados.

Una vez realizado, tenemos los datos necesarios para aplicar las siguientes fórmulas y obtener el valor de la materia seca y de la materia orgánica seca.

$$DM = \frac{\text{Muestra seca (105}^{\circ}\text{C, 48 h)}}{\text{Muestra fresca}} \times \%$$

$$oDM = \frac{\text{Muestra seca (105}^{\circ}\text{C, 48 h)} - \text{Muestra incinerada (550}^{\circ}\text{C, 6 h)}}{\text{Muestra fresca}} \times \%$$

Con estos resultados obtenemos valores en porcentaje, para calcular la materia seca en unidades realizamos otro análisis de la siguiente manera:

Para ello necesitamos un Erlenmeyer, un embudo y filtros, colocamos el filtro en el embudo y éste en el Erlenmeyer, y se realiza una filtración por succión, en un primer momento se deben lavar los filtros con agua destilada, y posteriormente dejar una hora en el horno a 105°C hasta que sequen, después se pasan al desecador y se pesan, este valor debe ser anotado.

Una vez el filtro esta lavado, seco y pesado, se vuelve a colocar en el embudo para realizar la filtración por succión, de tal manera que separamos el agua contenida en las muestras de fango del filtro que recoge la parte sólida.



Ilustración 27. Erlenmeyer con embudo para filtración

Una vez realizada la filtración, se deben colocar estos filtros en el horno a 105°C durante 24 horas, antes de introducirlo en el horno los filtros se ven de la forma que se muestra en la imagen.

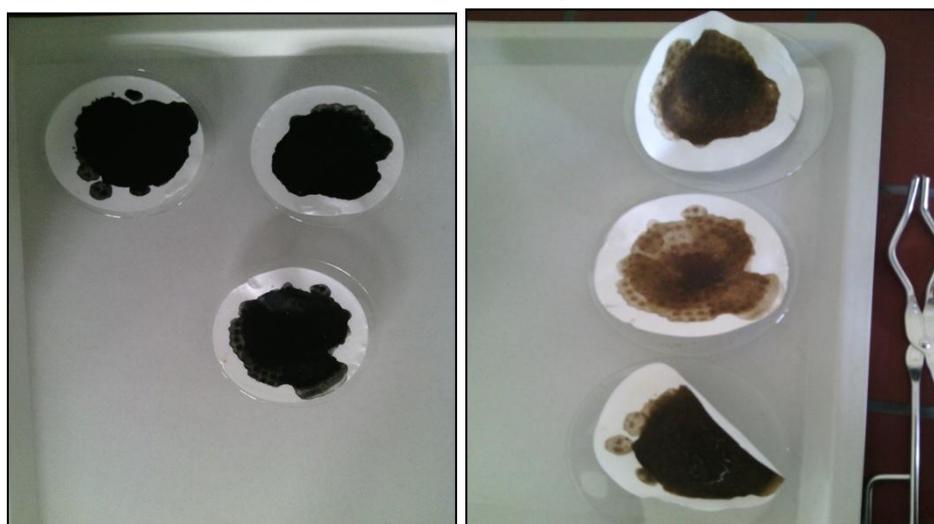


Ilustración 28. Filtros con fango tras filtración y después del horno

Una vez transcurrido este tiempo en el horno, los filtros pasan al desecador antes de ser pesados, este valor se anota para realizar los cálculos correspondientes.

$$Materia\ seca = \frac{Fango\ seco\ (105^{\circ}C,\ 24\ h)}{Volumen\ de\ fango\ utilizado}$$

Tras este cálculo obtenemos un valor en gramos por litro de la materia seca

En un principio, y tras los sucesivos arranques de la planta, se tomaron muestras que se colocaron en el congelador del laboratorio. Cuando se consiguieron condiciones estables, se comenzaron a analizar las muestras (en este caso eran muestras del agua residual y del agua tras el tratamiento con el clarificador secundario). Una vez se lograron condiciones estables se analizaron las muestras diariamente, junto con los demás parámetros mencionados.

5. Arranque de la planta, operación y seguimiento

El arranque de la planta fue lento, en un primer momento y al tratarse de un equipo no utilizado anteriormente, se tuvieron que revisar todas las partes de la planta piloto, y comprobar que teníamos todo lo necesario para su adecuado funcionamiento, este paso duro bastante tiempo, ya que primero se revisó bibliografía acerca del tratamiento a realizar y más tarde se preparó el equipo.

5.1 Preparación de la planta piloto

Para preparar el equipo para su funcionamiento se realizaron los siguientes pasos:

➤ **Conectar la unidad de suministro y comprobar que funciona correctamente**

Para hacer esto, conectamos unos tubos desde la unidad de suministro hacia el tanque agitado. Para ello, utilizamos los conectores A y C localizados en la unidad de suministro, estos deben unirse a través de los tubos a los conectores B y D localizados en la planta piloto. Se debe conectar la unidad de suministro eléctricamente a la planta, utilizando un conector localizado en la cabina de interruptores.



Ilustración 29. Conexión eléctrica

➤ **Calibrar los sensores de pH**

Se tomaron los dos sensores de pH de la caja que los contenía, y se les quito la tapa protectora (dotada con solución de Cloruro de potasio), se conectaron los cables de estos sensores a la caja de terminales.

Es necesario conectar la cabina de interruptores a corriente eléctrica y posteriormente encender el interruptor principal que pone en funcionamiento el equipo.

Se llevó a cabo la calibración de ambos sensores de pH, usando un transductor de medición dentro de la cabina.

Para la calibración se requirieron soluciones buffer con valores de pH definidos. En este caso se utilizaron soluciones de pH 4 y 7.



Ilustración 30. Caja de terminales

➤ **Otras instalaciones**

Instalación de QI-03, que determina el valor de pH para el reactor UASB. Para ello, es necesario desconectar el sensor anterior de la caja de terminales, colocamos este sensor en el punto de medición 3, localizado en el lado donde circula la bomba P5. Después reconectamos el cable a la caja de terminales.

Para la instalación de QI-02, que determina el valor de pH para el tanque agitado, necesitamos de nuevo desconectar el cable de la caja de terminales, sacar el punto 2 de medición, que se encuentra dentro del tanque agitado.

Se requiere una llave Allen para la instalación del sensor en el soporte.



**Ilustración 31.
Punto 3**

➤ **Colocar las válvulas en la posición adecuada**

Se abrió la válvula V18, y se cerraron V1,V2,V6,V8,V11,V12,V13,V16,V17,V20,V22,V23,V24,V25,V26,V28,V29,V30 y V32.

Se ajustó la válvula V3 en la unidad de suministro de tal manera que el agua fluya en el tanque de agua tratada. También se ajusta la V21 para que el agua fluya del reactor UASB a la unidad de suministro.

Así mismo, se ajustaron las válvulas V4, V5, V7, V14 y V15 en la posición adecuada, estas válvulas se encuentran en posición frontal a la planta y se utilizan también para tomar muestras.

➤ **Prueba de la planta piloto**

Para comprobar que todo funciona correctamente antes de empezar a operar, llenamos completamente el tanque de agua residual, tanque que llamaremos B1 con agua del grifo. El tanque B2, o tanque de agua tratada lo llenaremos aproximadamente un cuarto de su volumen con esta misma agua.

Observamos que las conexiones de las válvulas de drenaje V1 y V2 no tienen fugas, una vez comprobado, abrimos V2 para vaciar el tanque B2.

Posteriormente, se llenó el tanque agitado con agua del grifo, abriendo la tapa colocada en la parte de arriba de éste.

Una vez que el nivel de agua alcanza la altura de salida, el agua también fluye por el clarificador secundario. Así tenemos el mismo nivel de agua en los dos.

Del mismo modo, abrimos el reactor UASB por la parte de arriba y lo llenamos de agua.

Es necesario también llenar los dos tanques que controlan el pH del reactor UASB, tanques B5 y B6.

➤ **Velocidades, interruptores de nivel y controles**

- *Ajustar la velocidad*

Tras realizar lo anterior, debemos encender los siguientes componentes: máquina de agitación R1 y R2 correspondientes a la agitación del tanque agitado y del sedimentador, bomba de agua residual P1, bomba de recirculación del fango P2 y bomba de circulación P5.

Observamos que las velocidades pueden ser ajustadas con el potenciómetro.

Se apagaron las maquinas de agitación, para poner la bomba P1 a la máxima velocidad, 100%, esto quiere decir que el tanque agitado se llenaría lo más rápidamente posible.

- *Interruptores de nivel*

Es necesario comprobar que estos interruptores funcionan correctamente, para ello y tras realizar lo anterior se esperó a que el tanque agitado se llenara hasta activar el interruptor.

El efecto que se produjo fue que la bomba P1 para automáticamente, lo que significa que no entra más agua en el tanque agitado. Tras diez minutos la bomba se vuelve a activar automáticamente.

Para comprobar el interruptor de nivel del clarificador secundario, se encendió la bomba P6, se esperó hasta que se llenara hasta la activación del interruptor.

El efecto producido fue que el agua automáticamente es bombeada al reactor UASB, al igual que en el tanque agitado la bomba para de nuevo automáticamente después de diez minutos.

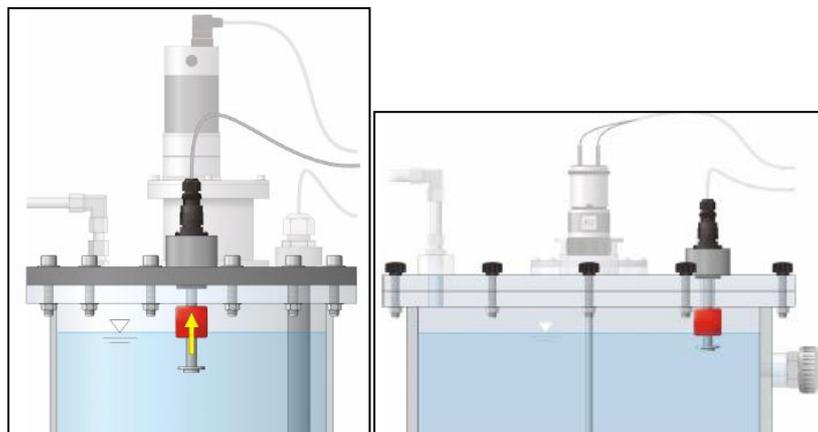


Ilustración 32. Interruptores de nivel, tanque agitado y clarificador secundario

Para el primer interruptor de nivel del reactor UASB, se encendió la bomba P7, se llenó el reactor hasta que el interruptor fue activado y los efectos que se produjeron fueron que el agua es bombeada automáticamente desde el reactor UASB hacia la unidad de suministro, la bomba para automáticamente tras cinco minutos aproximadamente.

En el caso del segundo interruptor, que se encuentra más arriba, se siguió llenando el tanque hasta su activación, esto produce que todas las bombas del equipo se paren y una luz roja en la cabina del equipo se enciende, como se muestra en la imagen posterior.

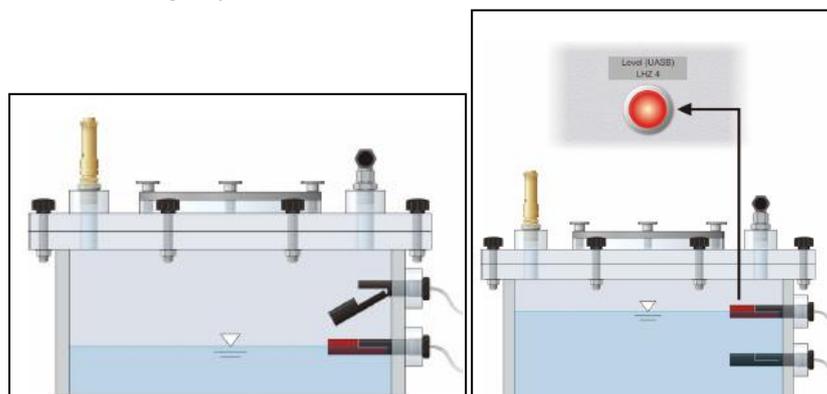


Ilustración 33. Interruptores de nivel del reactor UASB

- **Controles**

Es necesario comprobar que los controles de temperatura y pH funcionan adecuadamente, para ello realizamos lo siguiente.

Para el control de temperatura, encendemos la máquina de agitación del tanque agitado R1 y la bomba de circulación P5.

En los controladores del tanque agitado y del reactor UASB, se puede ajustar una variable de referencia, en este caso la más adecuada para la corriente de agua. Esta referencia se puede ver en la parte de abajo (A).

Se encendieron los tres calentadores (H1, H2 y H3), se comprobó si el agua en el reactor subía, para ello se observó el valor en la parte de arriba (B) mostrado en la figura.

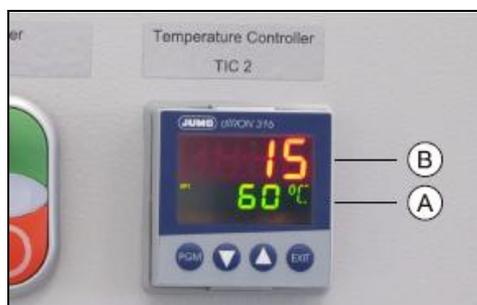


Ilustración 34. Control de temperatura

Para comprobar el control de pH, se encendieron las bombas P3 y P4 que son las que se encargan de controlar el pH en el reactor UASB. Igual que en el

controlador anterior se pone una referencia variable, esta referencia se puso más baja para comprobar que la bomba P3 perteneciente al tanque de ácido funcionaba, esta bomba empieza a bombear hacia el reactor UASB.

Del mismo modo, ponemos una referencia variable más alta, para comprobar que la bomba P4, perteneciente al tanque de solución básica empieza a bombear y P3 para.

En la imagen se muestra la referencia que en este caso es 7,0 y en rojo el pH real que tenemos, este se va modificando gracias a los tanques de ácido y base que ajustan el pH hasta el valor de referencia.



Ilustración 35. Control de pH

- *Instalación del software*

Es necesario un ordenador para conectarlo a la cabina de la planta piloto, una vez se inició el software, se comprobó que los valores marcados en la cabina de la planta correspondían con los valores registrados en el ordenador.

El software muestra los interruptores que están en funcionamiento y los que no, y permite registrar en tiempo real los valores que se tienen de pH y temperatura en los diferentes elementos de la planta.

A continuación se muestra el diagrama que podemos observar desde el ordenador.

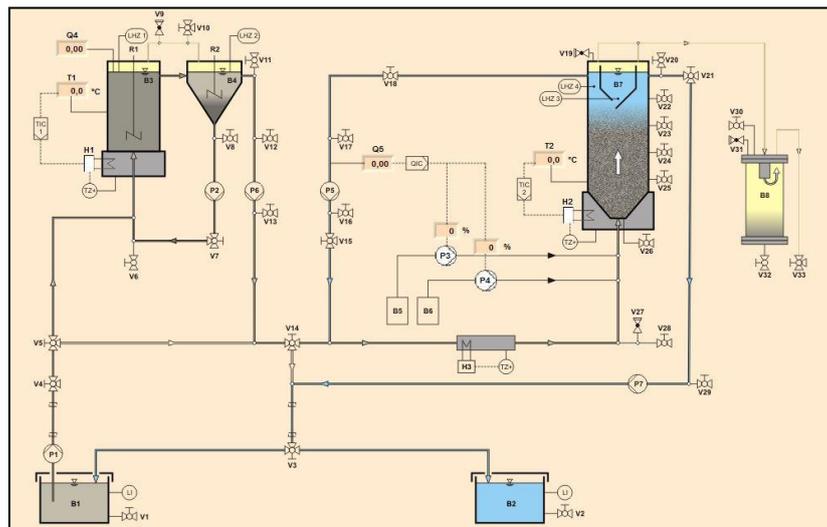


Ilustración 36. Diagrama del software

Durante la comprobación del funcionamiento de todos estos elementos, se comprobó que las bombas pertenecientes al control de pH para el reactor UASB, en un principio funcionaban correctamente, pero tras volverlo a comprobar no bombeaban, se tuvo que abrir la cabina de la planta y se vio que los fusibles estaban rotos, por lo que hubo que cambiarlos por otros nuevos para que éstas bombas volvieran a funcionar.

5.2 Arranque de la planta piloto, tanque agitado y clarificador secundario

El tanque agitado consta de sistema de agitación, el agua residual se trata continuamente, de esta manera el agua residual se dirige al tanque agitado y se pone en contacto con la biomasa suspendida (fango), así la materia orgánica presente en el agua residual es degradada biológicamente, esta agua abandona el tanque de forma continua, es inevitable que parte de la biomasa del tanque abandone éste con el agua tratada.

La biomasa que crece dentro del tanque no es suficiente para compensar esta pérdida. Por ello, el clarificador secundario es necesario para separar la biomasa del agua tratada. La biomasa que sedimenta es bombeada de vuelta al tanque agitado.

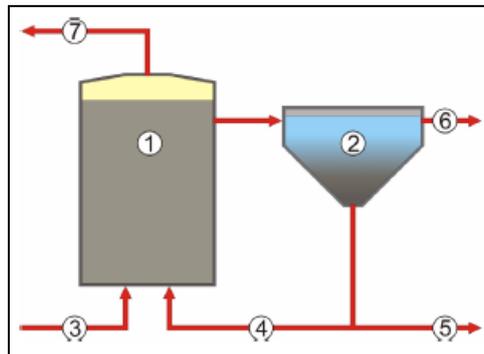


Ilustración 37. Proceso de fangos activos anaerobio.

1. Bioreactor, 2. Clarificador secundario, 3. Entrada de agua residual, 4. Recirculación del fango, 5. Superávit de fango, 6. Agua tratada, 7. Gas

5.2.1 1º Arranque

Al principio se decidió utilizar un agua residual de 2500 mg/l, se pensó que sería lo mejor para comenzar a arrancar la planta. Recordemos que en un principio solamente empezamos con el tanque agitado y el clarificador secundario, la parte del reactor UASB la dejamos para cuando consiguiéramos unas condiciones estables en el tanque agitado.

Aplicando lo explicado en material y métodos, se calcularon los químicos necesarios para crear esta agua residual y se preparó para empezar el experimento.

Siguiendo también los cálculos necesarios para calcular la cantidad de lodo necesario para el tanque agitado, se procedió a llenar este tanque con 4,13 L de fango (este fango tiene que ser

tamizado como ya se explicó, pero en esta primera vez no fue tamizado). Una vez llenado y siguiendo las instrucciones del manual se terminó de llenar con agua del grifo, así como el clarificador secundario.

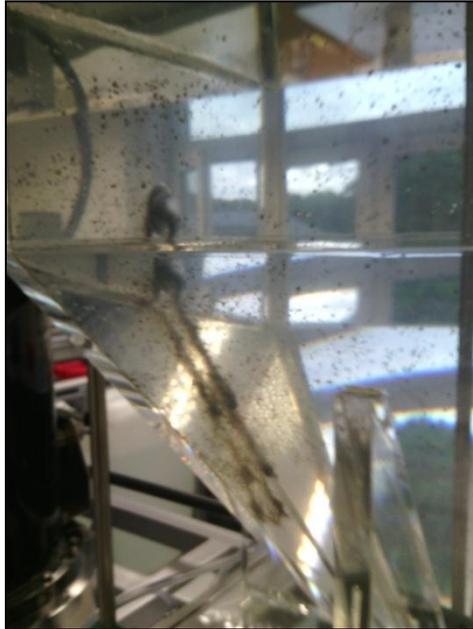


Ilustración 38. Fango del tanque agitado entrando en el clarificador secundario

El caudal decidido para operar siguiendo las recomendaciones del manual fue de 3 l/h, el manual nos dice que el caudal para operar la planta debe ser entre 3 y 7,5 l/h, pero se decidió empezar con el menor recomendado. Por tanto para este caudal y haciendo los cálculos correspondientes explicados anteriormente la velocidad para la bomba P1 fue de 16,75%, así mismo se decidió que la bomba de recirculación P2 tuviera la misma velocidad.

Las velocidades de agitación del tanque y del clarificador no se definieron, se fue probando qué velocidad daba mejores resultados. En un principio se puso una velocidad del 30% para el tanque y para el clarificador. La temperatura de referencia fue de 35°C, ya que es el óptimo para estos procesos.

El fango en este primer arranque **no fue tamizado**, (recordemos que este fango procede de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Wolfenbüttel), por lo que se podían apreciar partículas girando alrededor del tanque agitado, éstas quedaban atrapadas en los tubos de las bombas, por lo que se impedía el adecuado funcionamiento de la planta piloto.

Se decidió por tanto, vaciar de nuevo el tanque y el clarificador secundario, y comenzar de nuevo.

5.2.2 2º Arranque

En este segundo arranque, el fango fue previamente tamizado, y se introdujo la misma cantidad que en primer arranque, es decir 4,13 L. Este fango pertenecía al primer fango que se

consiguió de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, que se almacenó en un frigorífico durante el primer arranque.

Una vez inoculado este fango, el pH en el tanque agitado fue de 4 y en los posteriores días fue disminuyendo.

Los demás parámetros fueron iguales al anterior arranque. Este segundo arranque duró 5 días, los dos primeros días se obtuvo producción de biogás, esto fue analizado y en el primer día no se obtuvo producción de metano, pero en el segundo día la producción de metano fue de un 59%, tras esto no hubo más producción de biogás.

Tras revisar bibliografía, se decidió disminuir la agitación en el clarificador secundario, la velocidad que se puso fue de 16%.

El pH en estos momentos en el tanque se encontraba sobre 3,80, un pH demasiado bajo para este proceso. Se supuso que teníamos problemas en esta fase de acidificación (segunda fase de la degradación anaerobia después de la hidrólisis).

La producción de biogás fue nula.

Ya que el pH no aumentaba, se decidió empezar de nuevo el arranque.

5.3.3 3º Arranque

Se comenzó de nuevo el arranque de la planta con nuevo fango fresco procedente de la Planta de Tratamiento, se añadió la misma cantidad que en las otras ocasiones, el pH se encontraba en 6,7 en el tanque en el momento que fue introducido, pero rápidamente empezó a disminuir.

Para ello se preparó una solución de NaOH (4 g/100 ml) para evitar que el pH en el tanque volviera a disminuir bruscamente, esta solución se fue añadiendo al tanque de agua residual artificial y al mismo tanque agitado abriendo la tapa que se encuentra en la parte de arriba.

Encontramos que un posible problema anterior podría haber sido no controlar adecuadamente el pH en el tanque de alimentación, ya que esta agua se encontraba cercana a la neutralidad en un primer momento, pero según el tiempo pasa y se encuentra en el tanque se produce una gran disminución de pH haciendo que éste agua ácida entre en el tanque agitado.

En este momento surgió un problema, de repente, todo el equipo se apagó, esto fue debido a un fallo eléctrico. Por tanto, se decidió incrementar el pH en el tanque agitado y en el tanque de alimentación hacia un pH neutro con la solución de NaOH y esperar a que se arreglara este problema, con la intención de continuar el tratamiento.

Tres días después el problema fue resuelto, y se volvió a encender la planta, el pH en el tanque en estos momentos se encontraba en 6,7. En el contenedor de alimentación en cambio el pH se encontraba en 4,5, por lo que se añadió solución básica hasta pH 7.

En esta etapa tampoco se produjo producción de biogás.

En estos momentos el tanque agitado tenía un pH de 6,1, seguía disminuyendo por lo que se decidió parar de nuevo el reactor e iniciar de nuevo el proceso, tras consultar con personas especializadas en estos tratamientos, en el próximo arranque se cambiaron una serie de parámetros tras lo aprendido en estos arranques sin éxito.

5.3.4 4º Arranque

Antes de comenzar este arranque, se decidió analizar todos los parámetros a tener en cuenta en el proceso y se decidió cambiar lo siguiente gracias a las experiencias anteriores, tras consultar con personas especializadas y tras revisar bibliografía.

➤ *DQO del agua residual*

Hasta este momento, se preparaba un agua residual artificial con una DQO de 2500 mg/l, podemos decir que esto pudo ser un error, el fango que obtuvimos de la Planta trataba según datos de ésta agua con una DQO entre 500 y 700 mg/l, por lo que introducir de repente esta alta DQO podría no ser adecuado para el arranque.

Por tanto, se decidió preparar una DQO similar a la tratada en la planta, con una DQO de 600 mg/l, haciendo los cálculos correspondientes de la misma manera que se preparó la anterior.

➤ *Buffer*

Debido a que el agua residual una vez introducida en el tanque de alimentación, sufre una disminución del pH con el tiempo, probablemente por la degradación dentro de éste, se decide utilizar junto con los químicos necesarios para hacer esta agua, un buffer, en este caso carbonato de sodio, se decidió utilizar en la misma cantidad que el azúcar para crear el agua residual.

Además de esto se preparó una solución para tener preparada en el caso de que el pH del tanque de alimentación, a pesar de tener buffer, disminuyera demasiado.

Esta sería la única opción de incrementar el pH en el tanque agitado, ya que si abrimos éste para introducir una solución básica entra oxígeno en el tanque y por tanto no sería un tratamiento anaerobio.

➤ *Fango*

Según consejos de personas especializadas, se decidió inocular con la mayor cantidad de fango posible, por tanto se usó todo el fango que quedaba en el frigo de la anterior vez, el volumen final introducido tras el tamizado fue de 7,6 litros, antes se comprobó el pH de éste y se vio que era adecuado, en torno a 7.

A su vez, se decidió calentar este fango con el calentador del tanque agitado e introducir el agua a la misma temperatura, por tanto calentándola previamente, tanto la que se introduce en el tanque agitado como la del clarificador secundario.

Realizando esto evitamos cambios bruscos en el sistema.

Al introducir el fango en el tanque agitado y el agua residual hasta llenar el tanque, antes de cerrarlo utilizamos una bolsa de nitrógeno para eliminar el oxígeno que

quedará en el tanque y posteriormente cerrar la tapa del tanque, se realizó lo mismo tras llenar el clarificador secundario.

Tras este cuarto arranque logramos unas condiciones más o menos estables en el sistema por lo que no fue necesario arrancar de nuevo, a continuación veremos lo que ocurrió con el tratamiento.

Parámetros:

Parámetro	Unidades	Fórmula	Valor
Tiempo de retención hidráulico	Horas	$TRH = V_{\text{reactor}} / Q$	10
Carga volumétrica	Kg DQO/m ³ día	$CV = \text{kg DQO alimentada} / \text{m}^3 \text{ reactor} \cdot \text{día}$	1,44
Carga másica	Kg DQO/kg X · d	$F/M = \text{Kg DQO eliminada}$	0,061

Ilustración 39. Parámetros de operación en el tanque agitado

5.4 Operación y seguimiento

Cuando se consiguió que el arranque tuviera éxito, se operó en unas condiciones más o menos estables, en esta etapa fue necesario mantener un control continuo del pH en el tanque de alimentación, cuando este pH disminuía se incrementaba con una solución básica del mismo químico que se utilizaba como buffer en la elaboración del agua residual artificial, carbonato de sodio.

El caudal se mantuvo en 3 l/h, por lo que la bomba de alimentación P1 y la de recirculación P2 tenían una velocidad de 16,75%. La agitación en el tanque agitado se mantuvo en un 30% y en el clarificador secundario en un 11%.

La temperatura de referencia se mantuvo en 38,2 °C, y el pH en el tanque agitado oscilaba entre 6 y 7, cuando se veía que bajaba hacia 6 se incrementaba el pH en el tanque de alimentación llegando en ocasiones a tener un pH de 10, ya que rápidamente el pH disminuía en el tanque.

El agua residual artificial se preparaba en un recipiente de 5 litros en el que se colocaban los químicos necesarios y posteriormente se llenaba de agua del grifo, esto era llevado a agitación para disolver los químicos como se muestra en la figura.



Ilustración 40. Recipiente para la preparación del agua residual artificial

En un primer momento, esta preparación se introducía en el tanque de alimentación y posteriormente se añadía agua del grifo hasta alcanzar la dilución deseada.

Se decidió hacer la dilución previamente en un tanque más pequeño, en este caso de 30 litros y posteriormente llevarlo al tanque de alimentación para conseguir unas condiciones más homogéneas. Este tanque se sometía a agitación cuando se añadía solución básica para conseguir tener una medición de pH adecuada y homogeneidad en el tanque.



Ilustración 41. Unidad de suministro

Durante esta etapa se tomaron muestras de DQO tanto del agua residual como del efluente, en este caso del agua que salía del clarificador secundario, también se analizaron las bolsas de biogás, ya que en esta etapa tuvimos producción.

Una vez se tuvo esta parte de la planta piloto bajo control se decidió arrancar el reactor UASB.

5.5 Arranque del reactor UASB

Como ya se explicó en material y métodos, se consiguió fango de una empresa de bebidas para poderlo introducir en el reactor UASB.

Unos días antes de conseguir este fango se decidió preparar un incremento de la DQO del agua residual, ya que el fango de la empresa trataba agua con aproximadamente 2000 mg/l de DQO según información dada por la empresa.

Por tanto cinco días antes se decidió empezar a incrementar la DQO hasta llegar finalmente a 2500 mg/l cuando se inoculara el reactor UASB, esto se hizo en diferentes días para no introducir un cambio brusco en el tanque agitado.

Por lo tanto se decidió incrementar la DQO de la siguiente manera. Recordemos que manteníamos el agua residual con una DQO de 600 mg/l.

Día	DQO agua residual artificial (mg/l)
1º	600 - 800
2º	800 - 1200
3º	1200 - 1600
4º	1600 - 2000
5º	2000 - 2500

Tabla 3. Incremento de DQO agua residual

Una vez se llegó a un agua residual con 2500 mg/l de DQO, se procedió a llenar el reactor UASB con 40 litros de fango, después se terminó de llenar con agua del grifo.



Ilustración 42. Reactor UASB

El agua residual fluye desde abajo del reactor y se distribuye por el reactor lo más uniformemente posible. El agua fluye verticalmente a través de la cama de lodo de gránulos.

De esta manera, la materia orgánica es degradada por los microorganismos anaerobios, y como resultado en la parte de arriba se forman pequeñas burbujas.



Ilustración 43. Burbujas formadas en el reactor UASB

El gas que asciende conduce el agua junto a la biomasa, la mezcla es asistida por el flujo vertical en el lecho de fango. Por ello, no son necesarias maquinas de agitación en este reactor.

Por tanto este reactor consta de tres fases:

- Líquida, que corresponde al agua residual
- Gaseosa, correspondiente al biogás
- Sólida, correspondiente a los gránulos, la biomasa utilizada

Por ello existe un sistema de separación en la parte superior en la zona de tratamiento del agua, este sistema frena el flujo ligeramente, esto hace que los pellets que han ascendido se vuelvan al interior del reactor.

En la siguiente figura se muestra un esquema del reactor en la que se entiende mejor su funcionamiento.

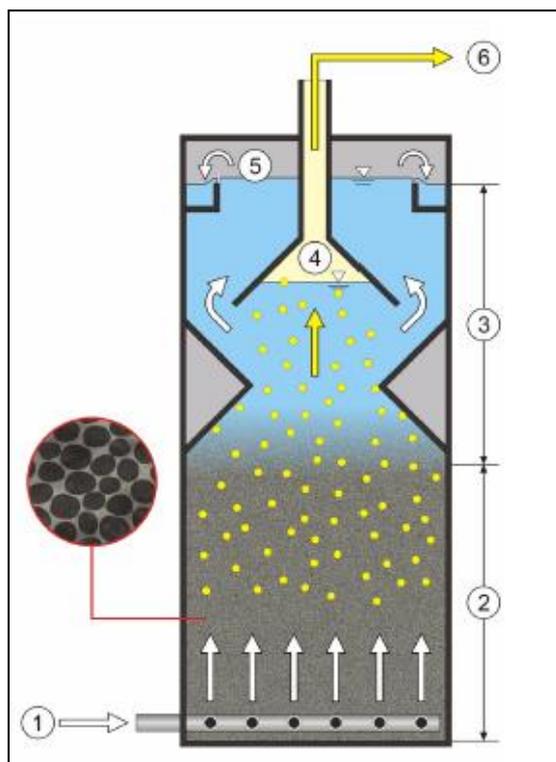


Ilustración 44. Reactor UASB.

1. Entrada de agua residual, 2. Lecho de lodo, 3. Zona de tratamiento del agua con un sistema de separación, 4. Compartimento para el gas, 5. Salida del efluente, 6. Descarga de gas

A continuación podemos ver los parámetros de este reactor.

Parámetro	Unidades	Fórmula	Valor
Tiempo de retención hidráulico	Horas	$TRH = V_{\text{reactor}} / Q$	16,6
Carga volumétrica	Kg DQO/m ³ día	$CV = \text{kg DQO alimentada} / \text{m}^3 \text{ reactor} \cdot \text{día}$	2,88
Carga másica	Kg DQO/kg X · d	$F/M = \text{Kg DQO alimentada} / \text{kg SV reactor} \cdot \text{día}$	0,9

Ilustración 45. Parámetros en el reactor UASB

5.6 Operación y seguimiento tras el arranque del reactor UASB

Tras el arranque satisfactorio del reactor UASB, éste operó adecuadamente los primeros días, durante esta etapa recordemos que el DQO del agua residual era de 2500 mg/l.

El pH del tanque agitado empezó a desestabilizarse en estos días, por ello se decidió no incrementar más la DQO del agua residual de momento.

Aproximadamente cinco días después de arrancar el reactor UASB, fue cuando se decidió incrementar la DQO del agua residual ya que el agua al pasar primero por el tanque agitado

sufría una degradación de la DQO y en el reactor UASB entraba un agua con una DQO que no llegaba a los 2000 mg/l.

También se decidió no hacerlo bruscamente, para no ocasionar problemas en el funcionamiento de la planta, por ello se empezó preparando un agua con una DQO de 2900 mg/l, teniendo en cuenta también que este no era el valor real de DQO que entraba a la planta, ya que en el tanque de alimentación también se produce una degradación.

El reactor UASB se acidifica rápidamente, ya que la bomba P3 que bombea solución ácida a este reactor bombea constantemente y es necesario rellenar el tanque de solución ácida diariamente. El pH de referencia que se puso para el reactor UASB fue de 7.

Cinco días después, el reactor UASB dejó de producir biogás.

En estos momentos, se pudo observar en el clarificador secundario un color rojizo, que se muestra en la figura. Aunque no se aprecia muy claramente, todo el clarificador tenía una tonalidad rojiza.



Ilustración 46. Clarificador secundario

Observando los tubos que conectan el equipo, se encontró este color rojizo en el tubo que conecta el tanque de alimentación con el tanque agitado.

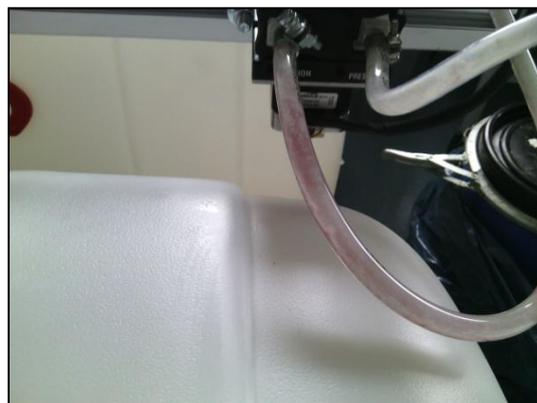


Ilustración 47. Coloración rojiza en el tubo del tanque de alimentación

Se tomaron muestras de este tubo para analizar al microscopio, veremos en los resultados las imágenes correspondientes a esta observación.

Para el tanque de alimentación, se decidió introducir agua diariamente, solamente el agua necesaria para ese día, para evitar una degradación mayor.

Debido a los resultados de los análisis de FOSTAC para el fango del tanque agitado, se decidió incrementar la cantidad de fango en este tanque, se añadieron aproximadamente cinco litros de fango fresco procedente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Wolfenbüttel.

Los resultados de estos análisis para el reactor UASB recomendaron aumentar la alimentación, por lo que se decidió aumentar la DQO en el tanque de alimentación de 2900 mg/l hasta 3300 mg/l, de momento.

Se decidió aumentar aún más la DQO y ver qué ocurría con la planta.

Cinco días después de mantener estas condiciones, se aumentó la DQO hasta 3800 mg/l. Pasados dos días ésta se elevó hasta 4500 mg/l.

Para analizar la degradación en el tanque de alimentación se tomaron muestras de las que posteriormente se verán los resultados.

6. Resultados y discusión

6.1 DQO

Como ya se explicó en material y métodos realizamos análisis de DQO diariamente tanto del agua residual como del efluente, tanto del agua que sale del clarificador secundario como del agua tratada que abandona el reactor UASB.

En los sucesivos intentos de arrancar el tanque agitado, se fueron tomando muestras que se almacenaron en el congelador del laboratorio. Estas muestras no son fiables ya que pasaron largo tiempo en el congelador, por tanto cuando se comenzó a tener unas condiciones más o menos estables en el tanque agitado se comenzaron a tomar muestras que se analizaban diariamente para evitar almacenarlas y que se produjera una degradación de la DQO que estas muestras tenían.

En la Tabla 5 que se encuentra en los Anexos podemos ver los resultados que obtuvimos tras el análisis de DQO de las muestras. Los primeros datos fueron de muestras que se congelaron por lo que se representa a partir del día 24 que es cuando se empezaron a analizar diariamente.

Esto se representa en las siguientes gráficas:

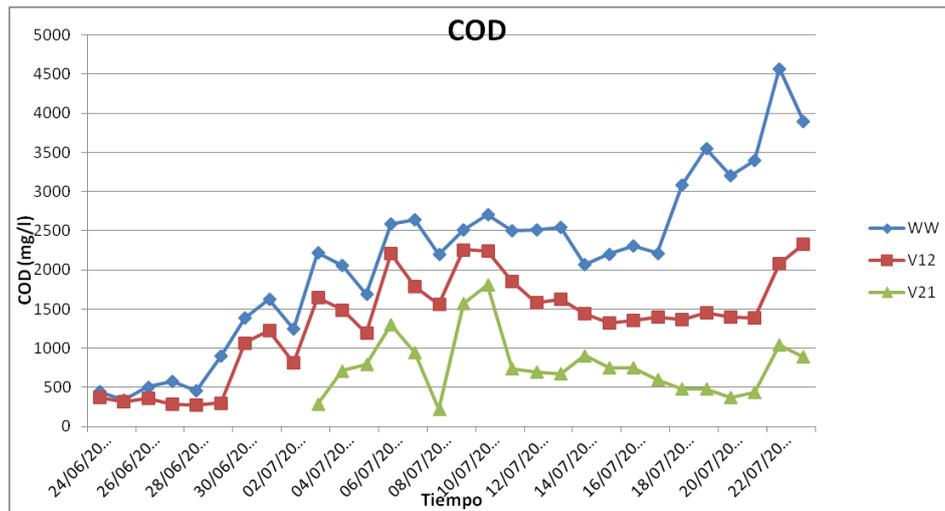


Ilustración 48. DQO

Como se puede ver en la imagen se representa la DQO frente al tiempo, en ella podemos ver el valor que tienen el agua residual en el tanque de alimentación (WW), tras el clarificador secundario (V12) y tras el reactor UASB (V21).

En el tanque de alimentación la DQO debería incrementarse, ya que se produjo un incremento de 600 mg/l hasta 4500 mg/L, pero como se ve en la gráfica, existen muchas variaciones en la DQO, ésta el día 28 sufre un incremento, debido a que por esas fechas empezamos a incrementar el valor, pero también sufre caídas, probablemente debido a la degradación en el tanque.

Este valor es muy relativo dependiendo del momento en el que se tome la muestra, no es lo mismo tomarlo nada más alimentar el tanque con nueva agua residual artificial, que transcurrido un tiempo, por ello es un valor que varía mucho, muy inestable y con caídas repentinas. En todo caso, vemos que aumenta en el tiempo, por lo que se incremento adecuadamente a pesar de la degradación en el tanque.

V12 corresponde al agua tras el clarificador secundario, como se puede ver en todo caso estos valores son menores que los del agua residual en el tanque, por lo que se produjo una degradación. Lo mismo ocurre tras el reactor UASB (V21), por lo que podemos decir que la planta piloto funcionaba adecuadamente en cuanto a la degradación del agua residual.

A continuación veremos una gráfica en la que podemos apreciar la degradación.

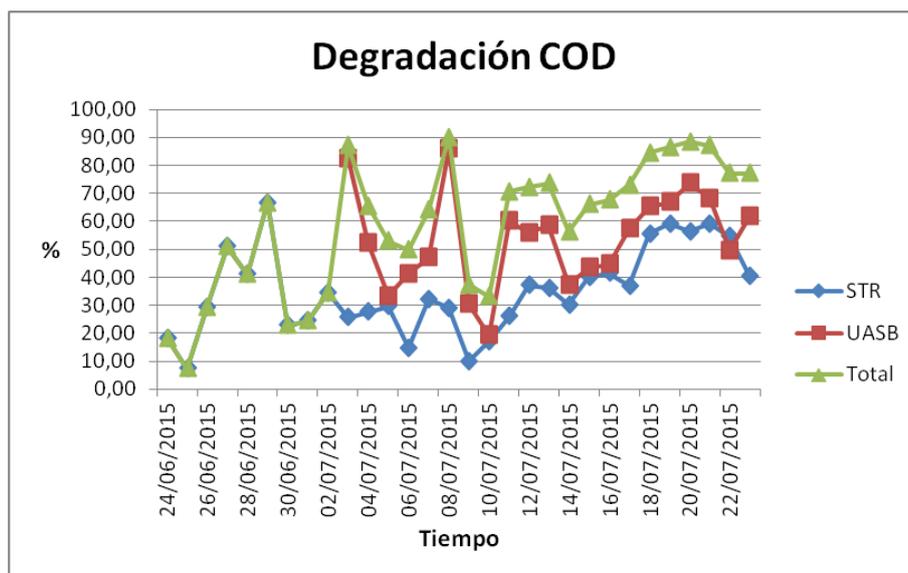


Ilustración 49. Degradación DQO

Se puede observar la degradación en porcentaje ocurrida tanto en el tanque agitado (STR), en el reactor UASB, así como la degradación total de la planta piloto.

Como se puede observar, generalmente, se obtiene una mayor degradación en el reactor UASB, esto varía también debido a lo explicado anteriormente sobre los análisis de DQO.

El tanque agitado vemos que incrementa la degradación con el tiempo, con variaciones, cuando se introdujo más fango al tanque agitado la degradación se fue incrementando como vemos a partir del día 8. Por tanto podemos decir que incrementar la biomasa en el tanque agitado produjo una mayor degradación de la materia orgánica del agua.

En general se produjo una adecuada degradación, como se puede ver en la degradación total, llegando en algunas ocasiones a un 90%.

Podemos ver estos datos en la Tabla 6 de los Anexos.

Para comprobar la degradación que se originaba en el tanque de alimentación, se decidió tomar muestras en el mismo día en varias ocasiones para ver que sucedía con la DQO del agua residual.

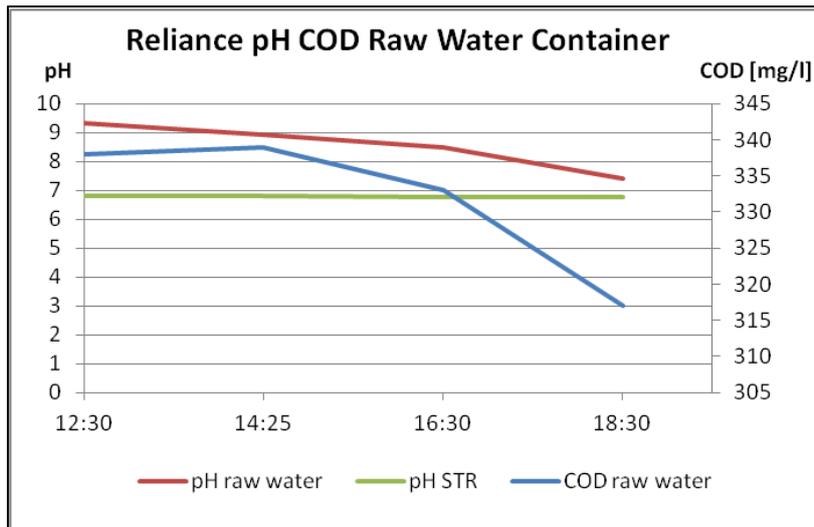


Ilustración 50. Degradación en el tanque de alimentación

En la gráfica que se muestra en la parte de arriba se puede ver en azul el valor de COD en cuatro horas diferentes durante el día tras añadir agua residual artificial al tanque. También en la gráfica se representa el valor de pH en el tanque de alimentación en rojo y el pH en el tanque agitado en verde.

Podemos ver como la DQO del agua residual disminuye en el tiempo, a la vez que disminuye poco a poco el pH en este tanque. Por tanto se puede afirmar que el pH está relacionado con la DQO y que al disminuir éste la DQO baja también en este caso. El pH en el tanque agitado se mantiene en este día estable durante las horas en las que se realizó la medición.

Se decidió también comprobar la diferencia entre una muestra congelada un día y la muestra tomada y analizada en el mismo tiempo. La diferencia se puede ver a continuación.

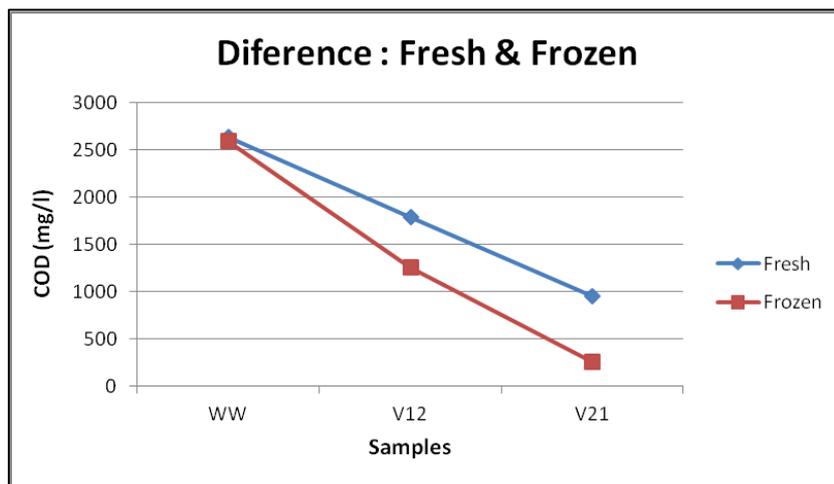


Ilustración 51. Diferencia entre muestra congelada y fresca

Como se puede ver en la gráfica vemos que existe una diferencia entre la muestra congelada y la fresca, en el caso del agua residual artificial no se puede apreciar una gran diferencia pero en el agua tras el clarificador secundario y tras el reactor UASB sí.

	COD (mg/l)		
	WW	V12	V21
Fresh	2640	1790	947
Frozen	2590	1260	257

Tabla 4. Muestra fresca y congelada

La diferencia va aumentando más según avanzamos en la planta piloto, siendo mayor tras el reactor UASB, por lo que podemos afirmar que es necesario para tener unas muestras con valores reales analizar las muestras en el mismo día, ya que la congelación y posterior descongelación para analizar la muestra produce una degradación que modifica la DQO dándonos valores menores a los reales.

6.2 FOSTAC

A continuación, se muestran los resultados obtenidos tras los análisis de FOSTAC.

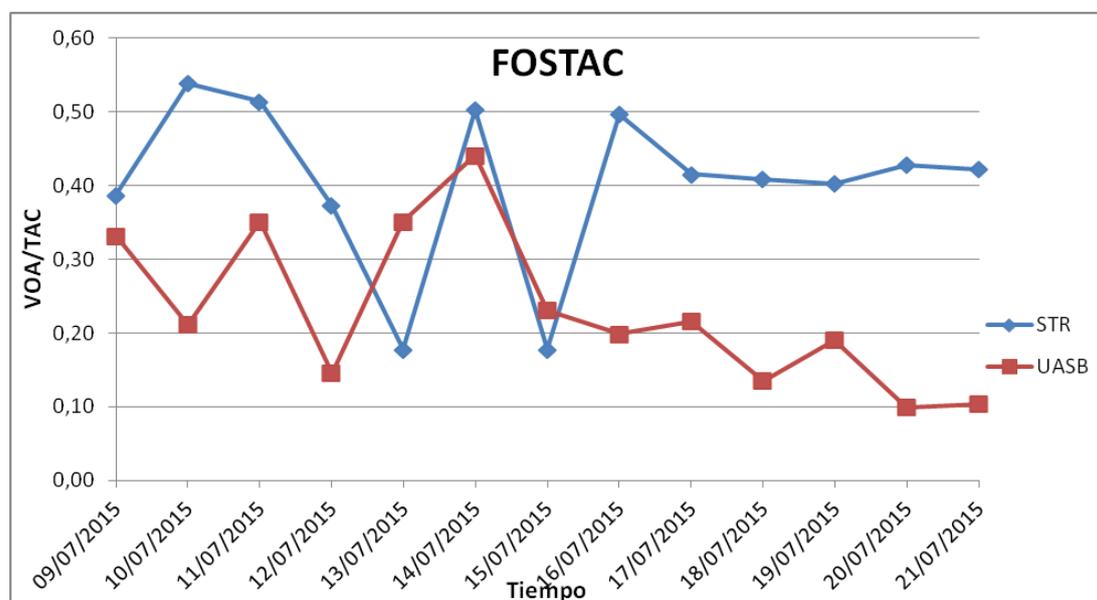


Ilustración 52. FOSTAC

Como se puede ver en la gráfica, existen muchas variaciones en estos resultados, que se estabilizan en los últimos análisis.

Los valores de estos análisis se muestran en la Tabla 7 y 8 de los Anexos, para el tanque agitado vemos que empieza a haber una estabilidad al final de la gráfica, esto es debido a que se incrementó el fango en el tanque agitado siguiendo las indicaciones que nos da la Ilustración 24 que nos recomendaba incrementarlo ya que el tanque estaba por debajo de la alimentación necesaria para operar adecuadamente, por ello a partir del día 16 se muestra estable y con un valor cercano a 0,4 lo que significa que el tanque opera adecuadamente.

En cuanto al reactor UASB, podemos ver bastantes variaciones, hasta el día 14 que el valor VOA/TAC empieza a disminuir y mantiene esta disminución a lo largo de los días posteriores, lo que significa que la planta no está bien alimentada. Cuando se vieron estos resultados se

decidió incrementar la DQO del agua residual ya que se pensó que esto podría ser el problema, estos bajos valores coinciden con una producción nula de biogás.

Cuando se incrementó la DQO se vio que esto no solucionaba el problema con el reactor UASB por lo que podemos decir que otros parámetros estaban relacionados en este mal funcionamiento, o un arranque inadecuado.

6.3 pH

El pH se controlaba diariamente tanto en el tanque de alimentación, como en el tanque agitado y el reactor UASB. En estos dos últimos se registraba gracias al software cada minuto diariamente.

El control del tanque agitado se controlaba a través de la adición de buffer al agua residual del tanque de alimentación, y el reactor UASB se controlaba automáticamente en la planta piloto con el tanque de ácido y base que bombean al reactor cuando este lo necesitaba, según el pH que se puso de referencia.

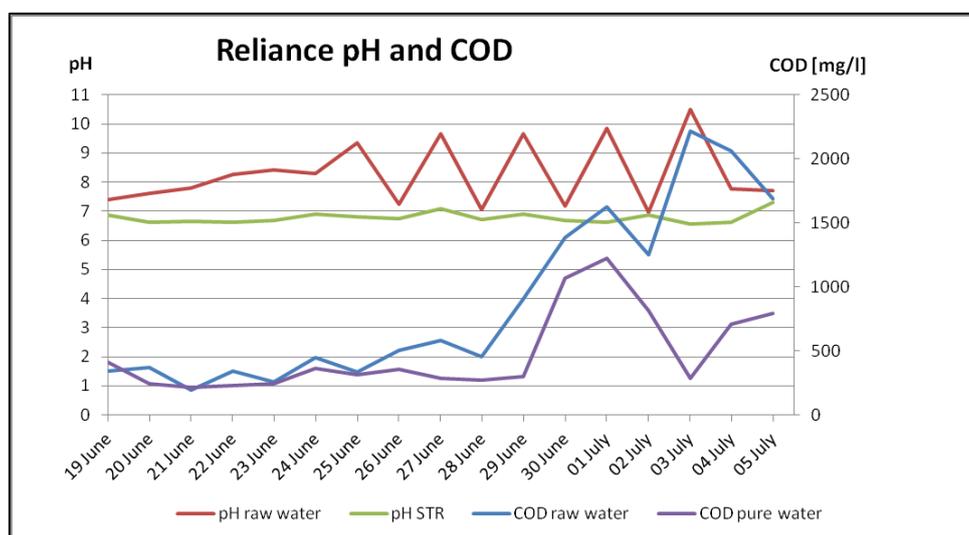


Ilustración 53. COD frente a pH

En este gráfico que se muestra de ejemplo, podemos ver como el agua en el tanque de alimentación (pH raw water, en rojo), se incrementa al principio debido a la adicción de buffer, y posteriormente sufre variaciones en el día, esto es debido a que una vez que se adicionaba nueva agua residual artificial el pH en el tanque era alto (sobre 9 hasta más de 10), y durante el día este pH va descendiendo, una vez que volvemos a añadir agua este vuelve a incrementarse y así sucesivamente, al principio de la gráfica no se producen tantas variaciones ya que se iba añadiendo buffer al tanque cada vez que se veía que el pH disminuía, pero esto no era una solución muy práctica por lo que se optó por añadir agua residual artificial al tanque diariamente, es decir se añadían los litros necesarios que utilizaría la planta durante un día, no como al principio que se llenaba el tanque o se llenaba hasta la mitad para tener para varios días, esto producía muchos cambios en el pH y una mayor degradación en el tanque, por tanto se añadía diariamente agua residual con buffer como ya se explicó en Material y métodos y de esta manera se tenía controlado.

La intención con todo esto era que en el tanque agitado se tuvieran unas condiciones adecuadas, es decir un pH cercano a la neutralidad.

Como se puede ver en la gráfica esto se consigue ya que el pH del tanque agitado (pH STR, en verde) se mantiene relativamente estable y cercano a 7.

En cuanto a la DQO, vemos que ocurre lo que se dijo también anteriormente, la carga de DQO y el pH están relacionados ya que siguen la misma tendencia en la gráfica, cuando el pH disminuye, la DQO lo hace también y viceversa. Se puede decir que al añadir nueva agua residual, se provoca en el tanque un incremento del pH y de la DQO del agua, esto disminuye en el tiempo, el pH baja y se produce una degradación de la DQO.

6.4 Alcalinidad

Los valores de alcalinidad se muestran en la Tabla 9, y se representan a continuación.

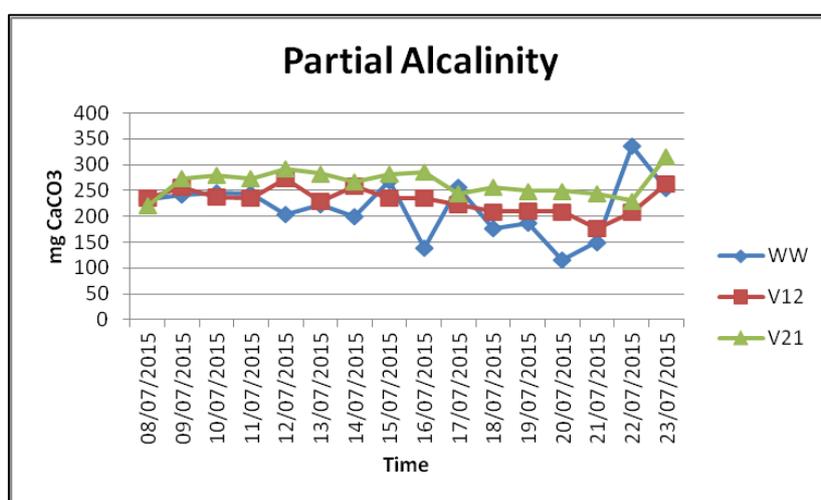


Ilustración 54. Alcalinidad parcial

Los valores de alcalinidad parcial son mayores en V21 (agua tratada tras reactor UASB), le sigue V12 (agua tratada tras clarificador secundario) y encontramos una mayor variación en el agua residual artificial del tanque de alimentación, esto es debido a la adición de buffer y en el momento en que recojamos la muestra, por ello se pueden ver mayores variaciones mientras que las otras dos muestras se encuentran estables más o menos en el tiempo, debido a que tenemos un medidor de pH registrado en la planta e intentamos mantener el pH cercano a la neutralidad, por eso encontramos variación en el agua residual artificial, porque sufre constantes cambios de adición de nueva agua, buffer, etc.

Podemos decir que las muestras V12 y V21 tienen suficiente potencial regulador, exceptuando el agua residual artificial que no siempre lo tiene ya que en algunas ocasiones llega a valores cercanos a 100 mg CaCO₃, esto puede ser debido a una inadecuada adición de buffer o no el valor suficiente como para que esa agua regule adecuadamente.

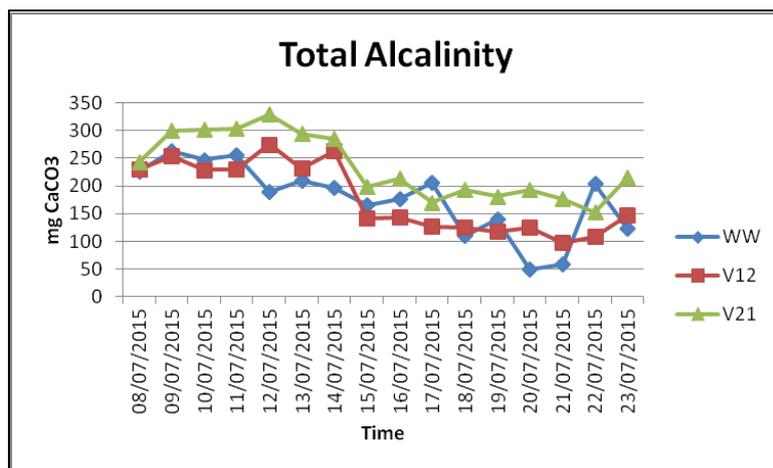


Ilustración 55. Alcalinidad Total

En esta gráfica se muestra la Alcalinidad Total, los valores más altos corresponden a los valores tras el reactor UASB, esto puede ser debido a que este reactor tenía un sistema automático de control del pH por lo que mantiene el pH cercano a la neutralidad.

Tras el clarificador secundario, vemos al principio valores más altos, que luego van disminuyendo.

6.5 Biogás

En las Tablas 10 y 11 se pueden ver los datos correspondientes a la composición del biogás, mostrando como principales compuestos el metano y el dióxido de carbono, en este caso podemos verlo en unidades de NL/d.

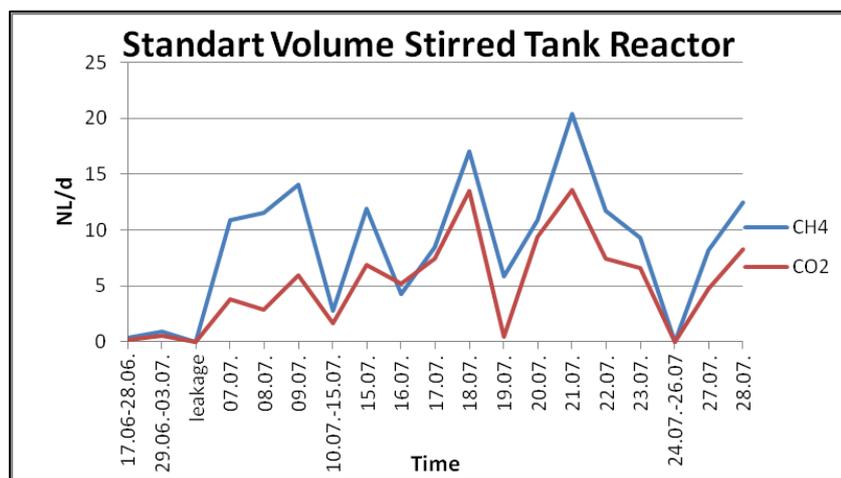


Ilustración 56. Producción de biogás en el tanque agitado

En este gráfico podemos ver como obtenemos mayor producción de metano que de dióxido de carbono, esta producción de biogás no es estable como se puede ver en el gráfico, la mayor producción se da el día 21, con 20 NL/d, esto corresponde a la etapa en la que en el tanque agitado se había añadido más fango.

A continuación, podemos ver la composición en porcentaje.

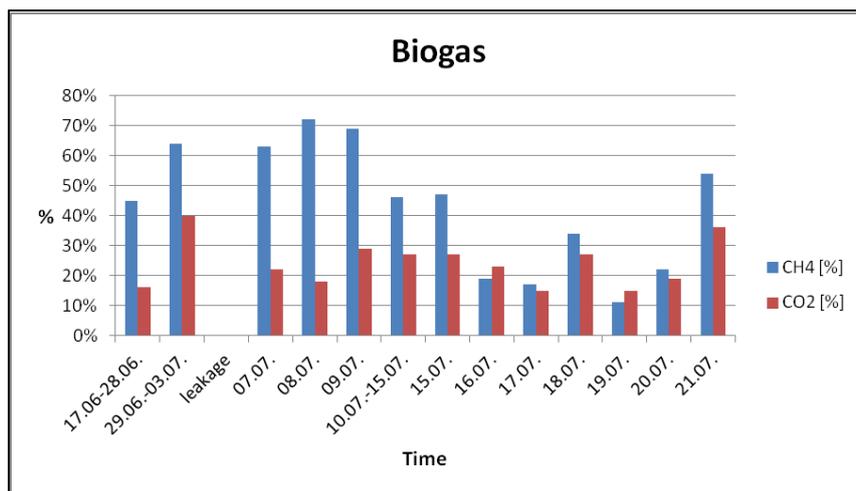


Ilustración 57. Composición del biogás en porcentaje en el tanque agitado

Como se puede observar el porcentaje de metano, varía de unos días a otros, los valores más altos se dan hacia el día 8 y 9, la cantidad de dióxido de carbono siempre es menor salvo en dos mediciones, estos porcentajes de metano están dentro de la normalidad y el buen funcionamiento, salvo en algunas ocasiones que son más bien bajos (sobre 10 – 20%).

A continuación veremos lo que ocurre en el reactor UASB.

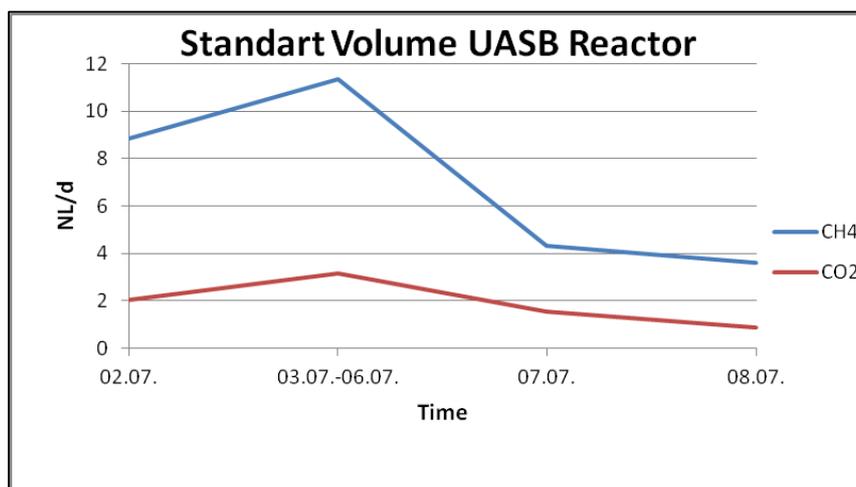


Ilustración 58. Producción de biogás en el reactor UASB

En el gráfico se muestra como una vez que se produjo el arranque del reactor UASB, la producción de biogás se iba incrementando pero a partir del día 6 esta producción va descendiendo y no vuelve más a crecer, esto coincide con los análisis de FOSTAC que nos indicaban que el reactor UASB estaba mal alimentado, por eso se decidió incrementar la DQO del agua residual por si éste podía ser el problema.

Tras realizar el aumento, el reactor UASB no presentó mejora en la producción de biogás, ya que no se producía nada, por ello se revisó el equipo por si existía alguna fuga o algún problema con las válvulas pero no se encontró el problema.

Hubiera sido necesario estudiar más detenidamente el seguimiento del reactor UASB para encontrar cual pudo ser el problema.

A continuación vemos la composición en porcentaje.

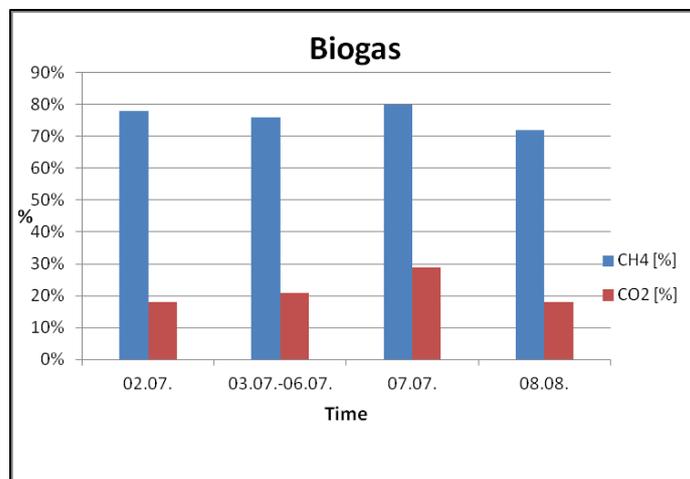


Ilustración 59. Composición del biogás en porcentaje en el reactor UASB

Como se ve en la gráfica, en el reactor UASB, los pocos días que se produjo biogás, éste tenía unos muy buenos porcentajes de metano, ya que se aproximan al 80%. Comparando con el tanque agitado, el reactor UASB produjo mayor porcentaje de metano, pero tampoco es comparable ya que el tanque agitado operó más días que el reactor UASB.

6.6 Materia seca

A continuación podemos ver los resultados del porcentaje de materia seca y materia orgánica seca para el tanque anaerobio agitado y el reactor UASB.

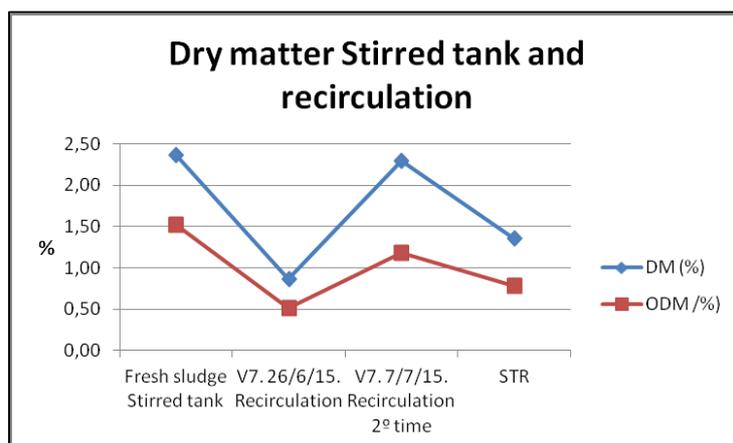


Ilustración 60. Materia seca en el tanque agitado y su recirculación

En esta gráfica podemos ver el porcentaje de materia seca en el tanque agitado y en la recirculación de éste, vemos que del fango del fango fresco tenemos el valor más alto, cercano al 2,50% de materia seca, este valor disminuye cuando medimos la muestra del tanque agitado cuando está en funcionamiento (el último representado en la gráfica).

En cuanto a las muestras de la recirculación, la primera muestra que se analizó (segunda muestra representada en la gráfica) vemos que tiene un valor menor de materia seca que la segunda muestra que se analizó de recirculación (tercera muestra representada), esto puede ser debido a que cuando se analizó la segunda muestra de recirculación se había alimentado al tanque agitado con más fango por ello tenemos un valor mayor, prácticamente similar al análisis del fango fresco.

La materia orgánica seca, vemos que se diferencia de la materia seca aproximadamente un 1% o menos, por lo que podemos decir que la mayor parte de nuestras muestras tienen un gran contenido orgánico.

A continuación veremos lo ocurrido en estos análisis para el reactor UASB.

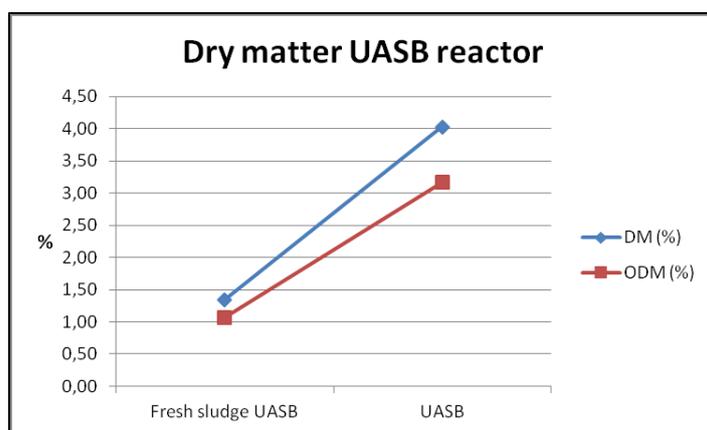


Ilustración 61. Materia seca en el reactor UASB

En la siguiente gráfica vemos dos muestras analizadas, una procedente del fango fresco obtenido de la empresa y la segunda una vez teníamos el reactor UASB en funcionamiento.

En este caso vemos como la materia seca en el reactor UASB es mayor que la del fango fresco, esto puede ser debido a una mayor cantidad de materia orgánica, en este caso la materia orgánica seca tiene una menor diferencia en la primera muestra en la casi toda la materia seca es orgánica, y en el segundo caso existe una diferencia mayor, cercana a un 1%.

En la Tabla 12 podemos ver los cálculos realizados para llegar a estos resultados.

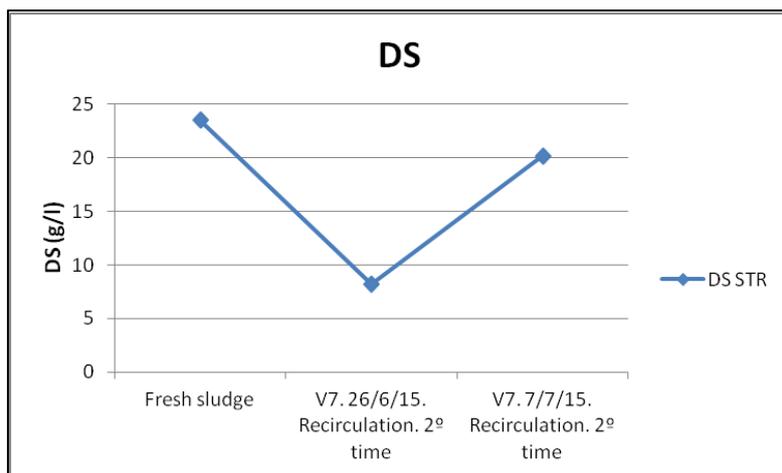


Ilustración 62. Materia seca

En el gráfico que se muestra arriba, se observan los resultados de materia seca en g/l, en este caso en el tanque agitado el mayor valor pertenece al fango fresco, como en la gráfica anterior, donde el valor se acerca a 25 g/l, en la primera muestra de recirculación también vemos como el valor es menor cercano a 10 g/l, una vez se produce el aumento de fango en el tanque este valor es incrementado.

En cuanto al reactor UASB, de este análisis tenemos un valor que pertenece al fango fresco, este valor es de 3,18 g/l, por tanto es un valor menor que el del fango fresco del tanque agitado, lo que significa que el fango del UASB fresco tiene mayor materia seca, puede ser debido a los gránulos que forman el fango.

En la Tabla 13 de los Anexos se muestran los cálculos.

6.7 Otros resultados

Como ya se explico anteriormente, encontramos una coloración rojiza en los tubos y en el clarificador secundario, tras tomar muestras y mirar al microscopio se vio lo siguiente.



Ilustración 63. Vista al microscopio de la muestra rojiza

Como se puede apreciar en la foto, vemos que en nuestra muestra hay presencia de algas, esto puede ser debido a que se encontraban en el fango o puede deberse a la suciedad generada en el tanque de alimentación, difícil de mantener limpio.

Tras consultar con personas especializadas en el tema, no consideraron grave la presencia de este alga por lo que se continuó con el proceso.

7. Conclusiones

Tras todo el trabajo realizado, podemos llegar a las siguientes conclusiones:

- El arranque de una planta piloto, en este caso para el tratamiento anaerobio del agua, es un proceso muy delicado por lo que se requiere comprobar que todos las partes de la planta funcionan adecuadamente para evitar fallos en el experimento.
- El arranque debe ser estudiado detalladamente antes de comenzar el proceso, para evitar tener que repetir esta operación. Debe ser realizado lentamente, controlando todos los parámetros que interfieren en él, y se debe comenzar con unas condiciones similares a las que el fango presentaba en su lugar de procedencia para evitar cambios bruscos que dificulten el arranque.
- El pH y la temperatura son dos factores clave en los procesos de tratamiento anaerobio del agua, ya no sólo del fango sino también del agua que se introduce en estos procesos.
- La creación de un agua residual artificial es un proceso sencillo que se puede realizar en el laboratorio, es necesario tener en cuenta que esta agua necesita un buffer para evitar que entre a la planta piloto en unas malas condiciones, esta agua debe ser neutra, o quizás ligeramente básica porque una vez que entre en el tratamiento sufre un proceso de acidificación típico en estos tratamientos anaerobios.
- Se debe tener en cuenta que el agua residual puede sufrir una degradación de la DQO al igual que una disminución del pH cuando se encuentra en el tanque de alimentación, por ello la mejor opción es alimentar diariamente el tanque con el agua necesaria para ese día y mantener el tanque cerrado, de esta manera evitamos que haya una degradación mayor en el agua.
- El fango utilizado para el tanque agitado de esta planta debe ser adecuadamente tamizado, de lo contrario las partículas que hay en él pueden quedarse atrapadas en los tubos por los que fluye el agua y ocasionar daños a la planta.
- La agitación en el sedimentador secundario debe ser constante y no demasiado alta, tiene que ser una agitación baja que permita que el agua tratada quede en la parte de arriba y el fango sobrante en la parte de abajo vuelva de nuevo al tanque agitado por medio de la recirculación.
- La toma de muestras para analizar los diferentes parámetros del agua debe realizarse diariamente y ser analizada lo antes posible, la congelación de las muestras es un error ya que obtenemos valores que no pertenecen a las condiciones reales que tenemos en nuestra planta, debido a la degradación que puede producirse.
- Es necesario controlar si la carga de fango es suficiente en los reactores o por el contrario necesitamos alimentarles con más para que se produzca la mayor degradación posible.
- El aumento de la DQO del agua residual artificial debe realizarse lentamente ya que los cambios bruscos pueden ocasionar fallos en el proceso, así mismo los cambios que se realicen deben realizarse de uno en uno para ver los resultados de estos cambios.

- Debido a que en todos los casos, cuando la planta operaba al completo, hemos tenido una degradación de DQO, mayor o menor, pero siempre existente, podemos suponer que la producción nula de biogás en el reactor UASB puede ser debida a una fuga, ya que teníamos degradación del agua.
- El seguimiento y la operación de una planta como esta debe ser controlado diariamente y tomar muestras para mantener todo bajo control.

8. Bibliografía

- Hung Thuan Tran, Young-Joo Park, My-Kyeong Cho, Dong-Jin Kim, Dae-Hee Ahn, (2006), Anaerobic Ammonium Oxidation Process in an Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor with Granular Sludge Selected from an Anaerobic Digester. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 11: 199-204.
- Lettinga Gatzke, Rebac Salih, Zeeman Grietje, (2001), Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment. *TRENDS in Biotechnology*, Vol 19.
- Van Lier Jules B., Grolle Katja C.F, Stams Alfons J.M, Conway de Macario Everly, Lettinga Gatzke. (1992). Start-up of a thermophilic upflow anaerobic sludge bed (UASB) reactor with mesophilic granular sludge. *Applied Microbiology and Biotechnology* 37: 130-135.
- Agrawal Latit K., Harada Hideki, Okui Hiroyuki. (1997). Treatment of Dilute Wastewater in a UASB Reactor at a Moderate Temperature: Performance Aspects. *Journal of Fermentation and Bioengineering*. Vol 83, No.2, 179-184.
- Barbosa R.A, Sant' Anna JR G.L. (1989). Treatment of Raw Domestic Sewage in a UASB Reactor. *Wat. Res.* Vol 23, No.12, pp 1483-1490.
- Uemura Shigeki, Harada Hideki, (2000). Treatment of Sewage by a UASB Reactor under moderate to low temperature conditions. *Bioresource Technology* 72. 275-282.
- Yu H.Q, Fang H.P.P, Tay J.H. (2001). Enhanced sludge granulation in upflow anaerobic sludge blanket reactors by aluminium chloride. *Chemosphere* 44, 31-36.
- Jayantha K.S, Ramanujam T.K,(1995) Start-up criteria for a Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor. *Bioprocess Engineering* 13, 307-310.
- Zhou Weili, Imai Tsuyoshi, Ukita Masao, Sekine Masahiko, Higuchi Takaya,(2006). Triggering forces for anaerobic granulation in UASB reactors. *Process Biochemistry* 41 36-43.
- Caicedo Mesa F.J, (2006). Diseño, construcción y arranque de un reactor UASB piloto para el tratamiento de lixiviados. Universidad Nacional de Colombia.
- Manual for work concerning biogas. Universidad de Ostfalia (Alemania)
- Kellow Manuel. Experiment Instructions: Anaerobic Water Treatment. CE702.(2012). GUNT, (Barsbüttel, Alemania).

9. Anexos

Date	COD (mg/l)		
	WW	V12	V21
19/06/2015	346	415,5	
20/06/2015	368	245	
21/06/2015	195	216,5	
22/06/2015	341,5	231	
23/06/2015	260	246,5	
24/06/2015	449	367	
25/06/2015	338	313	
26/06/2015	505	357	
27/06/2015	580	284	
28/06/2015	458	270	
29/06/2015	904	301	
30/06/2015	1384	1067	
01/07/2015	1623	1226	
02/07/2015	1250	817	
03/07/2015	2220	1650	287
04/07/2015	2060	1490	712
05/07/2015	1690	1190	794
06/07/2015	2590	2210	1300
07/07/2015	2640	1790	947
08/07/2015	2200	1560	221
09/07/2015	4850	3230	1570
10/07/2015	2709	2244	1810
11/07/2015	2503	1850	737
12/07/2015	2509	1579	695
13/07/2015	2542	1622	673
14/07/2015	2072	1444	905
15/07/2015	2203	1320	747
16/07/2015	2308	1352	748
17/07/2015	2214	1399	596
18/07/2015	3080	1367	475
19/07/2015	3550	1451	482
20/07/2015	3200	1395	368
21/07/2015	3400	1389	440

Tabla 5. DQO

Degradation		
STR	UASB	Total
18,26		18,26
7,40		7,40
29,31		29,31
51,03		51,03
41,05		41,05
66,70		66,70
22,90		22,90
24,46		24,46
34,64		34,64
25,68	82,61	87,07
27,67	52,21	65,44
29,59	33,28	53,02
14,67	41,18	49,81
32,20	47,09	64,13
29,09	85,83	89,95
10,01	30,41	37,38
17,17	19,34	33,19
26,09	60,16	70,56
37,07	55,98	72,30
36,19	58,51	73,52
30,31	37,33	56,32
40,08	43,41	66,09
41,42	44,67	67,59
36,81	57,40	73,08
55,62	65,25	84,58
59,13	66,78	86,42
56,41	73,62	88,50
59,15	68,32	87,06
54,55	49,69	77,13
40,26	61,85	77,21

Tabla 6. Degradación de DQO en porcentaje

Sludge	Date	Sample (g)	Mass total (g)	H2SO4 (until pH 5, ml)	H2SO4 (until 4.4)	VOA [ml]	TAC [ml]	VOA/TAC
STR	07/07/2015	5	20	2,21	0,28	854,6	2210	0,39
STR	08/07/2015	5,23	20	2,63	0,45	1353,29828	2514,34034	0,54
STR	09/07/2015	5,14	20	2,5	0,41	1249,12451	2431,90661	0,51
STR	10/07/2015	5	20	2,47	0,3	921	2470	0,37
STR	11/07/2015	5,174	20,186	3,12	0,19	540,255547	3043,11558	0,18
STR	12/07/2015	5,013	20,689	2,43	0,39	1260,93244	2507,19479	0,50
STR	13/07/2015	5,174	20,186	3,12	0,19	540,255547	3043,11558	0,18
STR	14/07/2015	5,097	19,996	2,52	0,4	1227,46655	2471,54797	0,50
STR	15/07/2015	5,1763	20,15	2,85	0,38	1152,7708	2773,57862	0,42
STR	16/07/2015	5,45	21,26	2,25	0,3	896,32844	2194,26606	0,41
STR	17/07/2015	5,7788	21,2838	2,19	0,29	811,518076	2016,48794	0,40
STR	18/07/2015	5,108	21,36	2,16	0,3	966,237275	2258,10493	0,43
STR	19/07/2015	5,146	20,005	2,1	0,29	860,717742	2040,92985	0,42
STR	20/07/2015	6,1157	20,5873	2,34	0,34	874,970741	1969,28733	0,44
STR	21/07/2015	5,177	20,118	2,02	0,26	763,60622	1962,44736	0,39

Tabla 7. FOSTAC para el tanque agitado

Sludge	Date	Sample (g)	Mass total (g)	H2SO4 (until pH 5, ml)	H2SO4 (until 4.4)	VOA [ml]	TAC [ml]	VOA/TAC
UASB	09/07/2015	5,01	21,38	2,89	0,31	1023,01876	3083,24351	0,33
UASB	10/07/2015	5,42	20,44	2,76	0,2	551,02214	2602,14022	0,21
UASB	11/07/2015	5,12	20,005	2,81	0,32	962,759375	2744,82666	0,35
UASB	12/07/2015	5,133	20,535	2,9	0,15	423,072764	2900,42373	0,15
UASB	13/07/2015	5,12	20,005	2,81	0,32	962,759375	2744,82666	0,35
UASB	14/07/2015	5,288	20,652	2,84	0,4	1221,60817	2772,86687	0,44
UASB	15/07/2015	5,6219	20,35	3,09	0,24	646,058717	2796,27439	0,23
UASB	16/07/2015	5,5944	21,0995	2,94	0,2	551,07554	2772,08146	0,20
UASB	17/07/2015	5,1315	20,6568	2,73	0,2	593,231277	2747,39667	0,22
UASB	18/07/2015	5,122	20,704	2,64	0,13	361,150254	2667,83288	0,14
UASB	19/07/2015	5,162	20,016	2,73	0,18	504,308485	2646,43936	0,19
UASB	20/07/2015	6,522	20,0516	3,35	0,13	256,733769	2574,85664	0,10
UASB	21/07/2015	5,305	20,545	2,77	0,11	278,583129	2681,88737	0,10

Tabla 8. FOSTAC para el reactor UASB

Date	Partial Alkalinity (4,3)			Total Alkalinity (5,75)		
	WW	V12	V21	WW	V12	V21
08/07/2015	234	235,52	219,88	226	230	242,65
09/07/2015	242,36	256,04	272,65	262,2	253	299
10/07/2015	245,29	236,5	278,52	247,25	228,85	301,3
11/07/2015	243,76	235,45	273,78	256,09	229,7	302,65
12/07/2015	203,27	273,63	292,2	189,75	274,85	328,9
13/07/2015	222,81	229,65	282,43	209,3	231,15	294,4
14/07/2015	200,34	258,97	266,79	196,65	262,2	285,2
15/07/2015	269	235	281	166	141	199
16/07/2015	139	235	286	177	143	213
17/07/2015	257	222	243	206	126	170
18/07/2015	176	209	257	110	125	193
19/07/2015	187	210	249	139	117	181
20/07/2015	116	209	249	50	125	193
21/07/2015	150	177	243	59	98	177
22/07/2015	336	208	230	204	108	152
23/07/2015	255	263	315	123	147	215

Tabla 9. Alcalinidad total y parcial

STR	CH4	CO2
17.06-28.06.	0,32	0,11
29.06.-03.07.	0,91	0,57
leakage	leakage	leakage
07.07.	10,92	3,81
08.07.	11,51	2,88
09.07.	14,09	5,92
10.07.-15.07.	2,81	1,65
15.07.	11,94	6,86
16.07.	4,27	5,17
17.07.	8,42	7,43
18.07.	16,99	13,49
19.07.	5,80	0,39
20.07.	10,83	9,35
21.07.	20,41	13,61
22.07.	11,74	7,46
23.07.	9,26	6,56
24.07.-26.07	gas production to low to measure	gas production to low to measure
27.07.	8,21	4,75
28.07.	12,46	8,23

Tabla 10. Producción de biogás en el tanque agitado y clarificador secundario en NI/d

UASB	CH4	CO2
02.07.	8,83	2,04
03.07.-06.07.	11,36	3,14
07.07.	4,33	1,57
08.07.	3,59	0,90
09.07.-end	gas production to low to measure	

Tabla 11. Producción de biogás en el reactor UASB en NI/d

1ª Analyse	Fresh sludge Stirred tank	04/06/2015							Sólidos totales	Sólidos volátiles
Sample	Ceramic crucibles	Weight (g)			Fresh sample	Dried sample	Ashed sample	DM (%)	o DM (%)	
		Ceramic crucibles + Sludge (10 ml)	After dryer	After muffle						
1	13,0579	22,1123	13,2702	13,1336	9,0544	0,2123	0,0757	2,34	1,51	
2	11,8613	21,0993	12,0808	11,9402	9,238	0,2195	0,0789	2,38	1,52	
3	12,0307	21,1759	12,2472	12,1082	9,1452	0,2165	0,0775	2,37	1,52	
Average								2,36	1,52	
		$DM = \frac{\text{dried sample (104}^\circ\text{C, 48 h)}}{\text{fresh sample}} [\%]$			$oDM = \frac{\text{dried sample (104}^\circ\text{C, 48 h) - ashed sample (550}^\circ\text{C, 6 h)}}{\text{fresh sample}} [\%]$					
2ª Analyse	V7. 26/6/15. Recirculation									
1	11,8614	21,0637	11,9237	11,8854	9,2023	0,0623	0,024	0,68	0,42	
2	13,0578	22,554	13,1032	13,0756	9,4962	0,0454	0,0178	0,48	0,29	
3	12,0311	22,4652	12,1806	12,0927	10,4341	0,1495	0,0616	1,43	0,84	
Average								0,86	0,52	
3ª Analyse	Fresh sludge UASB									
1	8,5808	17,8746	8,6776	8,6055	9,2938	0,0968	0,0247	1,04	0,78	
2	7,1865	16,4414	7,3999	7,2224	9,2549	0,2134	0,0359	2,31	1,92	
3	7,3977	17,0303	7,4632	7,4148	9,6326	0,0655	0,0171	0,68	0,50	
								1,34	1,07	
4ª Analyse	V7. 7/7/15. Recirculation 2ª time									
1	11,8616	21,6183	12,0808	11,9682	9,7567	0,2192	0,1066	2,25	1,15	
2	13,0581	22,4927	13,2763	13,1639	9,4346	0,2182	0,1058	2,31	1,19	
3	12,0306	22,1137	12,2633	12,1437	10,0831	0,2327	0,1131	2,31	1,19	
								2,29	1,18	
5ª Analyse	29/07/2015									
STR										
1	7,389	17,224	7,521	7,4458	9,835	0,132	0,0568	1,34	0,76	
2	7,183	17,345	7,321	7,2413	10,162	0,138	0,0583	1,36	0,78	
3	12,032	22,134	12,169	12,0893	10,102	0,137	0,0573	1,36	0,79	
								1,35	0,78	
UASB										
1	8,583	17,327	9,022	8,6857	8,744	0,439	0,1027	5,02	3,85	
2	13,053	24,251	13,58	13,1376	11,198	0,527	0,0846	4,71	3,95	
3	11,86	23,026	12,125	11,9329	11,166	0,265	0,0729	2,37	1,72	
								4,03	3,17	

Tabla 12. Cálculos de materia seca y materia orgánica seca

1º Analyse		Fresh sludge						
Sample	Filters after clean&dry (g)	Volume of sludge (ml)	Filters + sludge after dryer (g)	Sludge dryer (g)	Sludge dryer (same volume) (g/ml)	DS		
1	0,6873	16	1,0444	0,3571	0,02231875			
2	0,6626	25	1,2648	0,6022	0,024088			
3	0,7193	50	1,9279	1,2086	0,024172			
Average					0,02352625	23,52625	g/l	
	Mds = (Qw·COD)/Bds		Parameters					
	28,8		Qw (l/d)	72	52,8			
			COD (g/l)	0,6	0,6			
	Vs= Mds/Ds		Bds (g COD/g DS d)	1,5	1,5			
	1,224164497							
2º Analyse		V7. 26/6/15. Recirculation. 2º time			g/ml	DS		
1	0,7173	15	0,8121	0,0948	0,00632			
2	0,7384	15	0,8002	0,0618	0,00412			
3	0,7561	15	0,9686	0,2125	0,014166667			
Average					0,008202222	8,20222222	g/l	
	Mds	21,12						
	Vs	2,574911948						
3º Analyse		Fresh sludge UASB						
1	0,7718	25	0,8616	0,0898	0,003592			
2	0,7206	25	0,78	0,0594	0,002376			
3	0,7116	25	0,8009	0,0893	0,003572			
					0,00318	3,18	g/l	
4º Analyse		V7. 7/7/15. Recirculation. 2º time						
1	0,731	15	1,0419	0,3109	0,020726667			
2	0,752	15	1,0527	0,3007	0,020046667			
3	0,6753	15	0,9718	0,2965	0,019766667			
					0,02018	20,18	g/l	

Tabla 13. Materia seca en g/l

