

Estudio del Comportamiento del Tratamiento Anaerobio de Fangos ante Modificaciones del pH

Índice:

Memoria	4
1. Objeto	5
2. Objetivos	6
3. Introducción	7
4. Antecedentes	8
5. El Agua	10
5.1 Características	10
5.2 Calidad del Agua	12
5.2.1 Contaminación del Agua	15
5.2.2 Aguas Residuales	19
5.2.2.1 Urbanas	19
5.2.2.2 Industriales	22
6 EDAR	24
6.1 Esquema de una EDAR	24
6.1.1 Línea de Aguas	25
6.1.2 Línea de Fangos	28
6.1.3 Línea de Gas	29
7 Digestión de Aguas Residuales	30
7.1 Proceso Aerobio	30
7.2 Proceso Anaerobio	30
7.3 Comparación entre los Procesos	30
8 Proceso Anaerobio	32
8.1 Introducción	32
8.2 Naturaleza de los Lodos	32
8.3 Fases del Proceso	33
8.3.1 Hidrólisis	33
8.3.2 Acidogénesis	34

8.3.3	Metanogénesis.....	34
8.4	Factores que Influyen en el Proceso de Digestión Anaerobia.....	35
8.4.1	Ambientales.....	35
8.4.1.1	Temperatura.....	35
8.4.1.2	pH.....	36
8.4.1.3	Alcalinidad.....	37
8.4.1.4	Ácidos Grasos Volátiles.....	37
8.4.1.5	Potencial Redox.....	37
8.4.1.6	Nutrientes.....	38
8.4.1.7	Inhibidores.....	38
8.4.2	Operacionales.....	40
8.4.2.1	Agitación.....	40
8.4.2.2	Tiempo de Retención Hidráulico.....	41
8.4.2.3	Carga Volumétrica.....	41
8.4.2.4	Contenido en sólidos volátiles en suspensión. Cálculo de la biomasa..	42
8.5	Tipos de Digestores.....	44
8.5.1	Reactor Discontinuo o por Cargas.....	44
8.5.2	Reactor de Flujo de Pistón.....	45
8.5.3	Digestor Monoetapa o Tanque Agitado.....	46
8.5.4	Proceso de Contacto Anaerobio.....	47
8.5.5	Filtro Anaerobio.....	48
8.5.6	Digestor de Lecho en Película.....	49
8.5.7	Digestor de Lecho Fluidizado.....	50
8.5.8	Digestor de Lecho de Lodos.....	51
8.5.9	Reactor de Lecho Expandido.....	52
8.5.10	Digestión en dos Fases.....	53
8.5.11	Sistemas Mixtos.....	54
8.6	Biogás.....	55
8.6.1	Composición.....	55
8.6.2	Utilización.....	56
9	Desarrollo experimental.....	58
9.1	Equipos de Análisis.....	58

9.2	Reactivos de Análisis y Materia Prima.....	61
9.3	Métodos Analíticos.....	64
9.3.1	Caudal de Entrada.....	64
9.3.2	Caudal de Gas.....	64
9.3.3	Porcentaje de CO ₂ y CH ₄	65
9.3.4	Temperatura.....	67
9.3.5	Toma de Muestras.....	67
9.3.6	Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	68
9.3.7	pH.....	70
9.3.8	Alcalinidad.....	71
9.3.9	Ácidos Grasos Volátiles (AGV).....	72
9.4	Puesta en Marcha y Procedimiento Operacional.....	73
9.5	Análisis de Resultados.....	76
	Conclusiones.....	84
	Bibliografía.....	86
	Presupuesto.....	88

Memoria

1. Objeto

En los procesos de depuración biológica de las aguas residuales urbanas es muy significativa la problemática que genera la enorme proporcionalmente masa de fangos biológicos que se obtienen como subproductos.

Una situación semejante ocurre cuando se trata de depurar vertidos industriales urbanos de alta carga.

En ambos casos, la economía global de la operación está muy condicionada con la deshidratación y estabilización de los materiales anteriores.

Siendo evidente que el proceso sancionado más significativo utilizado en esas operaciones consiste tanto en la separación de agua como en la obtención de una demanda residual de oxígeno lo menor posible.

Por esta razón, se justifica que el objeto de este proyecto sea fijar la funcionalidad de las respuestas en la primera etapa del proceso de digestión anaerobia:

Se define el comportamiento de los fangos biológicos y los vertidos orgánicos de alta carga frente a la digestión anaerobia.

2. Objetivos

Los objetivos concretos que se plantean en este proyecto consisten en cubrir las siguientes etapas de modo que finalmente se puedan presentar propuestas aplicables que permitan plantear la mejor rentabilización de la operación que se estudia. Para ello se ha desarrollado el protocolo que se describe:

- Planteamiento del problema
- Estudio de la problemática que se pretende resolver
- Método a desarrollar
- Desarrollo experimental
- Evaluación de los resultados obtenidos
- Conclusiones finales

3. Introducción

- Planteamiento del problema:

En primer lugar, se pretende ubicar la tecnología interviniente en el proceso que no es otra que la digestión anaerobia de fangos en el marco de una EDAR. Lo que supone un cambio en cuanto a las variables que hemos de controlar para asegurar que dicha digestión se produzca con éxito si lo comparamos a un proceso aerobio pero que trae sus ventajas y recompensas.

- Estudio de la problemática que se pretende resolver:

Es importante a la hora de que la digestión anaerobia se produzca, tener muy en cuenta que para que ese proceso ocurra hace falta la intervención activa de la acción de seres vivos, y que para que el proceso sea eficiente, lo más eficiente posible, se han de generar las condiciones idóneas para su proliferación. Una variable que favorece el que se presenten estas es el pH del medio en el que se plantea la digestión.

- Método a desarrollar

Para poder evaluar el posible desempeño de un reactor anaerobio semejante en una EDAR, nos es necesario modelizar dicho reactor a una escala que nos permita monitorizarlo en un laboratorio bajo condiciones controladas y con asiduidad.

- Desarrollo experimental

Nuestro desarrollo experimental se basó en la utilización de un reactor anaerobio modelo al cual se le introdujo un agua problema y salió agua procesada y gas producto de la digestión. Se monitorizaron las variables del reactor para ver el desempeño en función de las condiciones predominantes.

- Evaluación de los resultados obtenidos

Con el paso del tiempo, la monitorización de las variables del reactor nos muestra tendencias en forma de gráficos que nos mostrarán el desempeño del reactor modelo en función de las variables que intervienen.

- Conclusiones finales

Trataremos de partir de los resultados obtenidos del modelo para sacar conclusiones con respecto a si el reactor anaerobio es adecuado para realizar la función de digerir fangos en una EDAR.

4. Antecedentes

La digestión de la materia orgánica no es un fenómeno limitado a los reactores anaerobios, ya que el hombre ha utilizado las capacidades de la naturaleza para fines propios: depuración de aguas residuales, estabilización de desechos sólidos, producción de metano. La digestión anaerobia ocurre en ecosistemas muy diversos tales como pantanos, sedimentos marinos o lacustres, en ambientes extremos como en lugares hipertermofílicos y en los tractos de los animales. Por ejemplo, el rumen de los rumiantes se puede comparar a un verdadero reactor anaerobio metanogénico.

El interés científico por la producción de gas combustible aparece a finales del siglo XVIII.

Breve historia:

- En 1682, R. Boyle predijo la posibilidad de obtener gas a partir de residuos animales y vegetales en descomposición.
- En 1776, Alejandro Volta descubre la conversión de materiales húmedos, mediante la fermentación anaeróbica en gas metano que ocurría en los pantanos.
- En 1854 Pasteur descubre el proceso de fermentación butírica, que es la conversión de los glúcidos en ácido butírico, por acción de las bacterias anaerobias *Clostridium butyricum*, en ausencia de oxígeno.
- En 1868, Béchamp muestra el origen microbiano del gas metano.
- En 1875, Popoff reporta producción de metano en ambientes diferentes a los pantanos.
- En 1884, Pastnier presentó el primer trabajo sobre la producción de metano a partir de residuos de granja
- En 1890, Omelianski estudiando la degradación de la celulosa plantea la producción de H_2 a partir de acetato y butirato, y la formación de metano por la reducción del CO_2 .
- En 1910, Söehngen confirma los hallazgos de Omelianski. Muestra la reducción del CO_2 como uno de los mecanismos de la formación de metano, y plantea otro mecanismo de formación, la descarboxilación del acetato.
- En 1930, Buswell plantea un proceso de dos etapas a las que denomina “Ácida” y “Metánica”. Señala la importancia de los ácidos grasos volátiles (AGV) como intermediarios del proceso, y se adhiere a la tesis de Söehngen
- En 1936, Barker explica la formación de metano como un proceso de oxidación-reducción.
- En 1948, Buswell utiliza trazadores radioactivos (^{14}C) para demostrar la formación de metano a partir del acetato

- En 1950, Hungate desarrolla técnicas microbiológicas para el aislamiento de bacterias anaerobias, pero no logra el crecimiento de bacterias utilizadoras de propionato, butirato u otros ácidos orgánicos.
- En 1967, Bryant estudia la fermentación metánica a partir del etanol.

A partir de 1900 se construyen en la India los primeros digestores para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos. En Europa comenzaron a funcionar en 1911 en Gran Bretaña. Durante la década de los años 20 y 30 se realizaron muchas experiencias a nivel de laboratorio y planta piloto. En muchos casos ya se utilizaban los lodos de aguas residuales como alimento de los digestores.

Con motivo de la Segunda Guerra Mundial se desarrollaron en Alemania gran número de instalaciones de digestión anaerobia con el fin de potenciar nuevas fuentes de energía renovables.

Aunque la tecnología se extendió al resto de Europa Occidental, cuando cesaron las condiciones de escasez sólo quedaron funcionando algunos digestores en Alemania y Francia.

Entre 1950 y 1970 la digestión anaerobia se desarrolló notablemente en la India y China. En ambos países las materias primas son los excrementos animales (800 millones de toneladas/año de estiércol de vaca en la India) y humanos, los desperdicios domésticos y algunos residuos agrícolas. En 1977 había en China unos 5 millones de digestores en funcionamiento, debido al parecer a la mayor economía de los materiales usados lo que reducía los costes de inversión.

Hasta que se produjo la crisis del petróleo, el proceso anaerobio se había considerado en países industrializados como USA, Canadá, parte de Europa, etc., como un tratamiento para reducir altas cargas orgánicas de algunos residuos, sin aprovechar los lodos como fertilizantes o el metano como combustible.

En las últimas décadas la investigación ha pasado de estudiar los procesos tradicionales de digestión aerobia y tratamientos físico-químicos a mostrar un mayor interés por los procesos anaerobios debido especialmente a su potencial energético.

5. El Agua

El estudio del agua se hace indispensable e incondicionalmente necesario puesto que es el hilo conductor de principio a fin de todo el proceso en que se basa este proyecto. Es a la vez materia prima y producto final, es el medio de transporte de la carga orgánica que será tratada y transformada a fin de obtener biogás combustible.

El agua constituye un elemento natural indispensable para el desarrollo de la vida y de las actividades humanas; resulta difícil imaginar cualquier tipo de actividad en la que no se utilice, de una u otra forma.

En nuestro planeta cubre el 75% de su superficie, pero no toda el agua se encuentra en condiciones aptas para el uso humano. El 97.5% del agua es salada, el 2.5% resultante es agua dulce distribuida en lagos, ríos, arroyos y embalses; esta mínima proporción es la que podemos utilizar con más facilidad.

El agua para satisfacer distintas necesidades se transforma en un recurso. Sin embargo no todas las personas disponen de él. Esto sucede por varios motivos, entre los cuales se puede mencionar la desigual distribución natural del agua en la superficie terrestre. Esta imposibilidad lleva a situaciones de escasez, que no tiene causas exclusivamente naturales, sino también sociales.

Esto nos permite decir que existe una estrecha relación entre la posibilidad de abastecimiento y el desarrollo, porque cuanto mayor es el desarrollo, mayor es la capacidad para obtenerla y mayor es la contaminación de la misma, así que de este modo se requiere el cada vez mayores cantidades de agua para realizar sus actividades. El mayor consumo de agua se debe al incremento de las prácticas de irrigación agrícolas, al gran desarrollo industrial o a la existencia de ciertos hábitos de consumo que, en ocasiones, implican su derroche.

5.1 Características

El agua es una sustancia formada por la combinación de dos volúmenes de hidrógeno y un volumen de oxígeno, y que constituye el componente más abundante en la superficie terrestre.

Hasta el siglo XVIII se creyó que el agua era un elemento, fue el químico inglés Cavendish quien sintetizó agua a partir de una combustión de aire e hidrógeno. Sin embargo los resultados de este experimento no fueron interpretados hasta años más tarde, cuando Lavoisier propuso que el agua no era un elemento sino un compuesto formado por oxígeno y por hidrógeno, siendo su fórmula H_2O .

Propiedades:

1. Físicas:

El agua es un líquido inodoro e insípido. Tiene un cierto color azul cuando se concentra en grandes masas. A la presión atmosférica (760 mm de mercurio), el punto de fusión del agua pura es de 0°C y el punto de ebullición es de 100°C, cristaliza en el sistema hexagonal, llamándose nieve o hielo según se presente de forma esponjosa o compacta, se expande al congelarse, es decir aumenta de volumen, de ahí que la densidad del hielo sea menor que la del agua y por ello el hielo flota en el agua líquida. El agua alcanza su densidad máxima a una temperatura de 4°C, que es de 1g/cc.

Su capacidad calorífica es superior a la de cualquier otro líquido o sólido, siendo su calor específico de 1 cal/g, esto significa que una masa de agua puede absorber o desprender grandes cantidades de calor, sin experimentar apenas cambios de temperatura, lo que tiene gran influencia en el clima (las grandes masas de agua de los océanos tardan más tiempo en calentarse y enfriarse que el suelo terrestre). Sus calores latentes de vaporización y de fusión (540 y 80 cal/g, respectivamente) son también excepcionalmente elevados.

2. Químicas

El agua es el compuesto químico más familiar para nosotros, el más abundante y el de mayor significación para nuestra vida. Su excepcional importancia, desde el punto de vista químico, reside en que casi la totalidad de los procesos químicos que ocurren en la naturaleza, no solo en organismos vivos, sino también en la superficie no organizada de la tierra, así como los que se llevan a cabo en el laboratorio y en la industria, tienen lugar entre sustancias disueltas en agua, esto es en disolución. Normalmente se dice que el agua es el disolvente universal, puesto que todas las sustancias son de alguna manera solubles en ella.

No posee propiedades ácidas ni básicas, combina con ciertas sales para formar hidratos, reacciona con los óxidos de metales formando ácidos y actúa como catalizador en muchas reacciones químicas.

Características de la molécula de agua:

La molécula de agua libre y aislada, formada por un átomo de Oxígeno unido a otros dos átomos de Hidrógeno es triangular. El ángulo de los dos enlaces (H-O-H) es de 104,5° y la distancia de enlace O-H es de 0,96 Å. Puede considerarse que el enlace en la molécula es covalente, con una cierta participación del enlace iónico debido a la diferencia de electronegatividad entre los átomos que la forman.

La atracción entre las moléculas de agua tiene la fuerza suficiente para producir un agrupamiento de moléculas. La fuerza de atracción entre el hidrógeno de una molécula con el oxígeno de otra es de tal magnitud que se puede incluir en los denominados enlaces de puente de hidrógeno. Estos enlaces son los que dan lugar al aumento de volumen del agua sólida y a las estructuras hexagonales de que se habló anteriormente.

5.2 Calidad del Agua

El agua presenta diversas condiciones de calidad: las aguas superficiales son por lo general más turbias que las aguas subterráneas y tienen un mayor número de bacterias que éstas. Pero las aguas subterráneas concentran una mayor cantidad de productos químicos en disolución (aunque no supera a la cantidad de productos químicos y microorganismos que tiene el agua de mar).

La pureza del agua se puede comprobar por la cantidad de capas de sedimentos que esta atraviese, ya que las capas de sedimentos retienen las impurezas.

Esta es una lista no exhaustiva de algunas de las alteraciones que presenta el agua:

Alteraciones físicas	Características y contaminación que indica
Color	<p>El agua no contaminada suele tener ligeros colores rojizos, pardos, amarillentos o verdosos debido, principalmente, a los compuestos húmicos, férricos o los pigmentos verdes de las algas que contienen.</p> <p>Las aguas contaminadas pueden tener muy diversos colores pero, en general, no se pueden establecer relaciones claras entre el color y el tipo de contaminación.</p>
Olor y sabor	<p>Compuestos químicos presentes en el agua como los fenoles, diversos hidrocarburos, cloro, materias orgánicas en descomposición o esencias liberadas por diferentes algas u hongos pueden dar olores y sabores muy fuertes al agua, aunque estén en muy pequeñas concentraciones. Las sales o los minerales dan sabores salados o metálicos, en ocasiones sin ningún olor.</p>
Temperatura	<p>El aumento de temperatura disminuye la solubilidad de gases (oxígeno) y aumenta, en general, la de las sales. Aumenta la velocidad de las reacciones del metabolismo, acelerando la putrefacción. La temperatura óptima del agua para beber está entre 10 y 14°C. Las centrales nucleares, térmicas y otras industrias contribuyen a la contaminación térmica de las aguas, a veces de forma importante.</p>
Materiales en suspensión	<p>Partículas como arcillas, limo y otras, aunque no lleguen a estar disueltas, son arrastradas por el agua de dos maneras: en suspensión estable (disoluciones coloidales); o en suspensión que sólo dura mientras el movimiento del agua las arrastra. Las suspendidas coloidalmente sólo precipitarán después de haber sufrido coagulación o floculación (reunión de varias partículas)</p>
Radiactividad	<p>Las aguas naturales tienen unos valores de radiactividad, debidos sobre todo a</p>

	isótopos del K. Algunas actividades humanas pueden contaminar el agua con isótopos radiactivos.
Espumas	Los detergentes producen espumas y añaden fosfato al agua (eutrofización). Disminuyen mucho el poder autodepurador de los ríos al dificultar la actividad bacteriana. También interfieren en los procesos de floculación y sedimentación en las estaciones depuradoras.
Conductividad	El agua pura tiene una conductividad eléctrica muy baja. El agua natural tiene iones en disolución y su conductividad es mayor y proporcional a la cantidad y características de esos electrolitos. Por esto se usan los valores de conductividad como índice aproximado de concentración de solutos. Como la temperatura modifica la conductividad las medidas se deben hacer a 20°C.

Alteraciones químicas	Contaminación que indica
pH	<p>Las aguas naturales pueden tener pH ácidos por el CO₂ disuelto desde la atmósfera o proveniente de los seres vivos; por ácido sulfúrico procedente de algunos minerales, por ácidos húmicos disueltos del mantillo del suelo. La principal sustancia básica en el agua natural es el carbonato cálcico que puede reaccionar con el CO₂ formando un sistema tampón carbonato / bicarbonato.</p> <p>Las aguas contaminadas con vertidos mineros o industriales pueden tener pH muy ácido. El pH tiene una gran influencia en los procesos químicos que tienen lugar en el agua, actuación de los floculantes, tratamientos de depuración, etc.</p>
Oxígeno disuelto (OD)	Las aguas superficiales limpias suelen estar saturadas de oxígeno, lo que es fundamental para la vida. Si el nivel de oxígeno disuelto es bajo indica contaminación con materia orgánica, septicización, mala calidad del agua e incapacidad para mantener determinadas formas de vida.
Materia orgánica biodegradable: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	DBO ₅ es la cantidad de oxígeno disuelto requerido por los microorganismos para la oxidación aerobia de la materia orgánica biodegradable presente en el agua. Se mide a los cinco días. Su valor da idea de la calidad del agua desde el punto de vista de la materia orgánica presente y permite prever cuanto oxígeno será necesario para la depuración de esas aguas e ir comprobando cual está siendo la eficacia del tratamiento depurador en una planta.
Materiales oxidables: Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Es la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar los materiales contenidos en el agua con un oxidante químico (normalmente dicromato potásico en medio ácido). Se determina

	<p>en tres horas y, en la mayoría de los casos, guarda una buena relación con la DBO por lo que es de gran utilidad al no necesitar los cinco días de la DBO. Sin embargo la DQO no diferencia entre materia biodegradable y el resto y no suministra información sobre la velocidad de degradación en condiciones naturales.</p>
Nitrógeno total	<p>Varios compuestos de nitrógeno son nutrientes esenciales. Su presencia en las aguas en exceso es causa de eutrofización. El nitrógeno se presenta en muy diferentes formas químicas en las aguas naturales y contaminadas. En los análisis habituales se suele determinar el NTK (nitrógeno total Kendahl) que incluye el nitrógeno orgánico y el amoniacal. El contenido en nitratos y nitritos se da por separado.</p>
Fósforo total	<p>El fósforo, como el nitrógeno, es nutriente esencial para la vida. Su exceso en el agua provoca eutrofización. El fósforo total incluye distintos compuestos como diversos ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico. La determinación se hace convirtiendo todos ellos en ortofosfatos que son los que se determinan por análisis químico.</p>
<p>Aniones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cloruros • Nitratos • Nitritos • Fosfatos • Sulfuros • Cianuros • Fluoruros 	<ul style="list-style-type: none"> • Indican salinidad • Indican contaminación agrícola • Indican actividad bacteriológica • Indican detergentes y fertilizantes • Indican acción bacteriológica anaerobia (aguas negras, etc.) • Indican contaminación de origen industrial <p>En algunos casos se añaden al agua para la prevención de las caries, aunque es una práctica muy discutida.</p>
<p>Cationes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sodio • Calcio y magnesio • Amonio • Metales pesados 	<ul style="list-style-type: none"> • Indica salinidad • Están relacionados con la dureza del agua • Contaminación con fertilizantes y heces • De efectos muy nocivos; se acumulan en la cadena trófica
Compuestos orgánicos	<p>Los aceites y grasas procedentes de restos de alimentos o de procesos industriales (automóviles, lubricantes, etc.) son difíciles de metabolizar por las bacterias y flotan formando películas en el agua que dañan a los seres vivos.</p> <p>Los fenoles pueden estar en el agua como resultado de contaminación industrial y cuando reaccionan con el cloro que se añade como desinfectante forman clorofenoles que son un serio problema porque dan al agua muy mal olor y sabor.</p>

5.2.1 Contaminación del Agua

Hay un gran número de contaminantes del agua que se pueden clasificar de muy diferentes maneras. Una posibilidad bastante usada es agruparlos en los siguientes ocho grupos:

1. Microorganismos patógenos:

Son los diferentes tipos de bacterias, virus, protozoos y otros organismos que transmiten enfermedades como el cólera, tífus, gastroenteritis diversas, hepatitis, etc. En los países en vías de desarrollo las enfermedades producidas por estos patógenos son uno de los motivos más importantes de muerte prematura, sobre todo de niños.

Normalmente estos microbios llegan al agua en las heces y otros restos orgánicos que producen las personas infectadas. Por esto, un buen índice para medir la salubridad de las aguas, en lo que se refiere a estos microorganismos, es el número de bacterias coliformes presentes en el agua.

2. Desechos orgánicos:

Son el conjunto de residuos orgánicos producidos por los seres humanos, ganado, etc. Incluyen heces y otros materiales que pueden ser descompuestos por bacterias aeróbicas, es decir en procesos con consumo de oxígeno. Cuando este tipo de desechos se encuentran en exceso, la proliferación de bacterias agota el oxígeno, y ya no pueden vivir en estas aguas peces y otros seres vivos que necesitan oxígeno. Buenos índices para medir la contaminación por desechos orgánicos son la cantidad de oxígeno disuelto o la DBO (Demanda Biológica de Oxígeno).

3. Sustancias químicas inorgánicas:

En este grupo están incluidos ácidos, sales y metales tóxicos como el mercurio y el plomo. Si están en cantidades altas pueden causar graves daños a los seres vivos, disminuir los rendimientos agrícolas y corroer los equipos que se usan para trabajar con el agua.

4. Nutrientes vegetales inorgánicos:

Nitratos y fosfatos son sustancias solubles en agua que las plantas necesitan para su desarrollo, pero si se encuentran en cantidad excesiva inducen el crecimiento desmesurado de algas y otros organismos provocando la eutrofización de las aguas. Cuando estas algas y otros

vegetales mueren, al ser descompuestos por los microorganismos, se agota el oxígeno y se hace imposible la vida de otros seres vivos. El resultado es un agua maloliente e inutilizable.

5. Compuestos orgánicos:

Muchas moléculas orgánicas como petróleo, gasolina, plásticos, plaguicidas, disolventes, detergentes, etc. acaban en el agua y permanecen, en algunos casos, largos períodos de tiempo, porque, al ser productos fabricados por el hombre, tienen estructuras moleculares complejas difíciles de degradar por los microorganismos.

6. Sedimentos y materiales suspendidos:

Muchas partículas arrancadas del suelo y arrastradas a las aguas, junto con otros materiales que hay en suspensión en las aguas, son, en términos de masa total, la mayor fuente de contaminación del agua. La turbidez que provocan en el agua dificulta la vida de algunos organismos, y los sedimentos que se van acumulando destruyen sitios de alimentación o desove de los peces, rellenan lagos o pantanos y obstruyen canales, rías y puertos.

7. Sustancias radiactivas:

Isótopos radiactivos solubles pueden estar presentes en el agua y, a veces, se pueden ir acumulando a lo largo de las cadenas tróficas, alcanzando concentraciones considerablemente más altas en algunos tejidos vivos que las que tenían en el agua.

8. Contaminación térmica:

El agua caliente liberada por centrales de energía o procesos industriales eleva, en ocasiones, la temperatura de ríos o embalses con lo que disminuye su capacidad de contener oxígeno y afecta a la vida de los organismos.

Merece especial atención el primer grupo, que trata sobre la contaminación biológica. Las aguas residuales dependiendo de su composición y concentración pueden llevar en su seno gran cantidad de organismos. El componente biológico es básico debido a su capacidad metabólica y por lo tanto, potencial de transformación de los compuestos presentes, tanto los orgánicos como los inorgánicos. También influyen en su presencia la temperatura y el pH, puesto que cada organismo requiere unos valores determinados de estos parámetros para desarrollarse. Los principales grupos de organismos que se pueden encontrar en las aguas residuales son: Bacterias, Virus, Algas, Protozoos, Hongos, Plantas y Animales.

Bacterias:

El papel que desempeñan las bacterias en los procesos de descomposición (tanto aerobia como anaerobia) y estabilización de la materia orgánica, tanto en el marco natural como en las plantas de tratamiento de aguas residuales, es amplio y de gran importancia. También intervienen en los procesos de desnitrificación, nitrificación y acumulación de fósforo en sistemas de eliminación de nutrientes. Las bacterias presentes en el agua residual pueden ser de origen fecal o implicadas en el proceso de biodegradación. En las aguas residuales brutas predominan especies pertenecientes a grupos como: Escherichia, Salmonella, Pseudomonas, Aeromonas, Serratia, Nocardia...etc.

Algas:

La presencia de las algas en las aguas residuales es muy importante, ya que contribuyen, con las bacterias, a la estabilización de la materia orgánica presente en las aguas residuales, utilizándola como fuente de carbono. Además, su crecimiento se ve favorecido por la presencia en las aguas residuales de distintas formas de nitrógeno y fósforo. Sin embargo, las algas pueden representar grandes inconvenientes en las aguas superficiales ya que pueden reproducirse rápidamente cuando las condiciones son favorables, provocando su recubrimiento por colonias flotantes y dando lugar a procesos de eutrofización. Estos fenómenos de eutrofización están producidos por algas de géneros como: Anabaena, Spyrogira, Euglena, Enteromorpha, Cladophora, Chlorella, Anacystis...

Protozoos:

Son microorganismos eucariotas heterótrofos cuya estructura está formada por una sola célula. Los protozoos que se encuentran más frecuentemente en las aguas residuales son: amebas, flagelados, y ciliados libres, fijos y reptantes. Juegan un papel muy importante en los procesos de tratamiento biológico, especialmente en los filtros percoladores y fangos activados. También en la purificación de los cursos de agua, ya que son capaces de mantener el equilibrio natural entre los distintos tipos de microorganismos; pueden eliminar las bacterias suspendidas en el agua, evitando la producción de efluentes con turbidez.

Hongos:

Los hongos son organismos eucariotas, multicelulares, aerobios y no fotosintéticos. Muchos de ellos son saprofitos, basan su alimentación en la materia orgánica muerta. Junto con las bacterias, los hongos son los principales responsables de la descomposición del carbono en la biosfera. Desde el punto de vista ecológico, los hongos presentan ciertas ventajas sobre las bacterias: pueden crecer y desarrollarse en zonas de poca humedad y en ambientes de pH bajo. Sin la colaboración de los hongos en los procesos de degradación de la materia orgánica

el ciclo del carbono se interrumpiría en poco tiempo y la materia orgánica empezaría a acumularse.

Virus:

Los virus son partículas parásitas de células de otros organismos, formadas por un cordón de material genético y una capa proteínica que los recubre. Utilizan las células del cuerpo vivo que los acoge para la producción de nuevas partículas virales. Su presencia en las aguas residuales es debida a la excreción por parte de individuos infectados, ya sean humanos o animales. Por tanto, pueden representar un importante peligro para la salud pública. Poseen la capacidad de adsorberse a sólidos fecales y otras materias, favoreciendo de esta forma su supervivencia durante tiempos prolongados en las aguas residuales. Además, y debido a su gran supervivencia, son resistentes a algunos tratamientos del agua residual, constituyendo un peligro para las aguas receptoras. Algunos quedan en el efluente, siendo un peligro para la salud. Aunque el mayor riesgo lo constituyen aquellos que quedan en el fango en grandes cantidades, sobre todo si este fango se utiliza como fertilizante sin tratamientos previos.

Plantas y animales:

Las diferentes plantas y animales que tienen importancia en las aguas residuales tienen tamaños muy variados. El conocimiento de estos organismos resulta útil al determinar la toxicidad de las aguas residuales evacuadas al medio ambiente. Además, son importantes a la hora de determinar la efectividad de la vida biológica empleada en los tratamientos secundarios para destruir los residuos orgánicos. Desde el punto de vista de la salud pública, existen ciertos especímenes que merecen especial atención y preocupación como son algunas especies de nematodos, rotíferos, trematodos y cestodos que ocupan la cima de la pirámide trófica y ejercen una acción depredadora sobre el resto de organismos del medio.

5.2.2 Aguas Residuales

El uso del agua para el consumo diario antropogénico y como elemento para el desarrollo de muchas actividades industriales, agrícolas y también urbanas hace que las aguas limpias se conviertan en aguas residuales, es decir, aguas contaminadas.

Por contaminación de las aguas se entiende el aporte de materias o formas de energía de una manera directa o indirecta que impliquen una alteración o modificación de su calidad en relación a sus usos posteriores o a su función ecológica.

El agua no es un bien ilimitado, por lo tanto al contaminarla nos estamos perjudicando a nosotros mismos. Por esta razón controlar la contaminación de las aguas es uno de los factores más importantes para la continuidad del equilibrio entre el hombre y el medio en el cual vive y la prevención, reducción y eliminación de los contaminantes de esta agua es, en la actualidad, una prioridad.

Debido al ciclo hidrológico del agua, estas aguas contaminadas nos vuelven en forma de lluvias, por lo que antes de ser consumida la debemos tratar, y esta es la función básica de las potabilizadoras, conseguir un agua desinfectada y limpia de contaminación, que preserve la salud evitando así el riesgo de enfermedades.

Del mismo modo que es necesaria una red de abastecimiento, también es necesaria una de saneamiento para depurar las aguas contaminadas.

5.2.2.1 Urbanas

Llamamos aguas residuales urbanas a los líquidos procedentes de la actividad humana, cuya composición en gran parte es agua. La contaminación principal de las aguas residuales urbanas es la materia orgánica, tanto en suspensión como en disolución, que en su mayoría es de tipo degradable.

Origen:

1. Aguas negras o fecales: Son las que contienen los residuos sólidos y líquidos que constituyen las heces humanas fundamentalmente.
2. Residuos domésticos: Proceden de la actividad general de las viviendas, ya sean residuos procedentes de la limpieza doméstica, la actividad en la cocina...etc.
3. Pluviales y Lixiviados: Al caer la lluvia sobre la ciudad, arrastra partículas de polvo y fluidos presentes en las superficies expuestas.

4. Infiltraciones: A veces las zonas verdes urbanas, por la composición del suelo, permiten el paso del agua de arrastre hacia los acuíferos, con el consiguiente peligro de contaminación.

Composición:

Sólidos:

- Sólidos sedimentables: aquellas partículas más gruesas que se depositarán por gravedad en los fondos de los receptores. Su análisis se realiza por gravimetría y volumetría (previamente se les decanta y tamiza como método de separación). El 70% suele tener origen orgánico, mientras el 30% restante es inorgánico.
- Sólidos en suspensión: son las partículas flotantes, perceptibles a simple vista y separables también utilizando medios físicos. Generalmente se componen de un 68% de sustancias orgánicas y 32% inorgánicas.
- Disoluciones coloidales: partículas de tamaño intermedio entre las disoluciones verdaderas y las partículas en suspensión. Su porcentaje orgánico suele rondar el 75%. Una característica importante a tener en cuenta es su gran capacidad de absorción y la facilidad con la que se degradan.
- Sólidos disueltos: En este grupo se incluyen todos aquellos que pasan por el crisol de Gooch. Su proporción es de 40% de orgánicos y 60% de inorgánicos.

Gases:

- Oxígeno disuelto: Es el más importante, es un gas que es consumido tanto por la actividad química como la biológica.
- Ácido sulfhídrico: Gas formado por la descomposición de ciertas sustancias (tanto orgánicas como inorgánicas que contienen azufre. Es poco estable al calor, descomponiéndose en azufre e hidrógeno. Su presencia se manifiesta principalmente por los olores que produce.
- Anhídrido carbónico: Se produce en las fermentaciones de los compuestos de las aguas residuales negras. El CO_2 se presenta libre o como bicarbonatos. La parte libre puede ejercer acciones químico-biológicas en el seno del agua residual, como la destrucción de carbonatos.
- Metano: formado en la descomposición anaerobia de la materia orgánica, al reducir ciertas bacterias el CO_2 utilizando hidrógeno. Es aprovechable como combustible.
- Otros: se producen además otros gases como son ácidos grasos volátiles y derivados del nitrógeno.

Líquidos:

A veces, las aguas residuales urbanas pueden contener líquidos específicos como gasolinas, alcoholes...etc.

Análisis típico del agua residual municipal

Constituyente	Concentración, mg/l *		
	Fuerte	Media	Débil
Sólidos, totales:	1200	720	350
Disueltos totales	850	500	250
Fijos	525	300	145
Volátiles	325	200	105
Suspendidos totales	350	220	100
Fijos	75	55	20
Volátiles	275	165	80
Sólidos sedimentables, ml/l	20	10	5
Demanda bioquímica de oxígeno, 5 días a 20° C (DBO ₅)	400	220	110
Carbono orgánico total (COT)	290	160	80
Demanda química de oxígeno (DQO)	1000	500	250
Nitrógeno (total como N):	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoniacal	50	25	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
Fósforo (total como P)	15	8	4
Orgánico	5	3	1
Inorgánico	10	5	3
Cloruros	100	50	30
Alcalinidad (como CaCO ₃)	200	100	50
Grasas	150	100	50

5.2.2.2 Industriales

Las aguas residuales industriales son aquellas que proceden de cualquier actividad en cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utilice el agua. Son enormemente variables en cuanto a caudal y composición, difiriendo las características de los vertidos, no sólo de una industria a otra, sino también dentro de un mismo tipo de industria. Estas en general están más contaminadas que las aguas residuales urbanas y además, con contaminaciones mucho más difíciles de eliminar.

A veces, las industrias no emiten vertidos de forma continua, sino únicamente en determinadas horas del día o incluso únicamente en determinadas épocas de año, dependiendo del tipo de producción y del proceso industrial. También son habituales las variaciones de caudal y carga a lo largo del día.

Su alta carga unida a la enorme variabilidad que presentan, hace que el tratamiento de las aguas residuales industriales sea complicado, siendo preciso un estudio específico para cada caso.

Tabla que agrupa algunos tipos de industrias con sus principales contaminantes.

Sector industrial	Substancias contaminantes principales
Construcción	Sólidos en suspensión, metales, pH.
Minería	Sólidos en suspensión, metales pesados, materia orgánica, pH, cianuros.
Energía	Calor, hidrocarburos y productos químicos.
Textil y piel	Cromo, taninos, tensoactivos, sulfuros, colorantes, grasas, disolventes orgánicos, ácidos acético y fórmico, sólidos en suspensión.
Automoción	Aceites lubricantes, pinturas y aguas residuales.
Navales	Petróleo, productos químicos, disolventes y pigmentos.
Siderurgia	Cascarillas, aceites, metales disueltos, emulsiones, sosas y ácidos.
Química inorgánica	Hg, P, fluoruros, cianuros, amoníaco, nitritos, ácido sulfhídrico, F,

	Mn, Mo, Pb, Ag, Se, Zn, etc. y los compuestos de todos ellos.
Química orgánica	Organohalogenados, organosilícicos, compuestos cancerígenos y otros que afectan al balance de oxígeno.
Fertilizantes	Nitratos y fosfatos.
Pasta y papel	Sólidos en suspensión y otros que afectan al balance de oxígeno.
Plaguicidas	Organohalogenados, organofosforados, compuestos cancerígenos, biocidas, etc.
Fibras químicas	Aceites minerales y otros que afectan al balance de oxígeno.
Pinturas, barnices y tintas	Compuestos organoestámicos, compuestos de Zn, Cr, Se, Mo, Ti, Sn, Ba, Co, etc.

6 EDAR

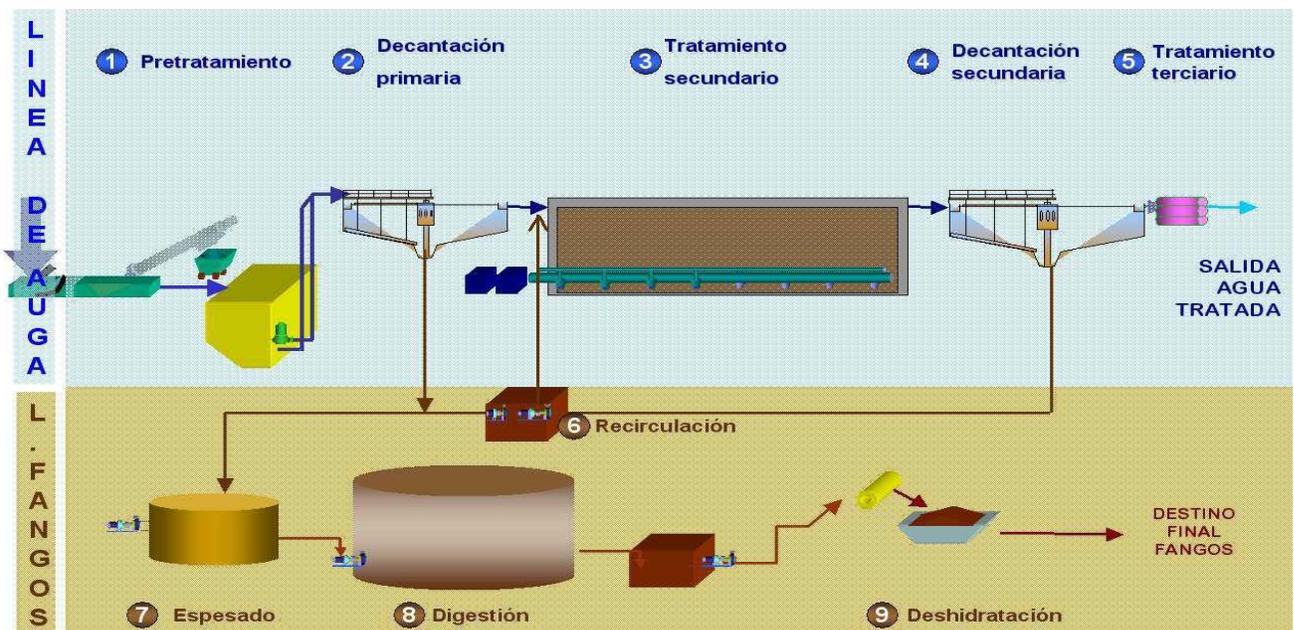
Una estación depuradora de aguas residuales (EDAR), también llamada planta de depuración o planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), tiene el objetivo genérico de tratar dichas aguas para reducir su contaminación antes de ser vertidas, para que no causen impactos medioambientales y alteren el estado normal de la naturaleza.

En general, las estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas tratan el agua residual local, procedente del consumo ciudadano en su mayor parte, así como de la escorrentía superficial del drenaje de las zonas urbanizadas, mediante procesos y tratamientos más o menos estandarizados y convencionales. Existen también EDAR que se diseñan y construyen para empresas, con tratamiento especializado del agua residual que se genera en el proceso industrial.

6.1 Esquema de una EDAR

La depuradora tiene en general dos líneas de funcionamiento: La línea de aguas y la línea de fangos, y en el caso de digestión anaerobia existe una tercera, la línea de gas, muy importante en el desarrollo de este proyecto.

ESQUEMA DE TRATAMIENTO



6.1.1 Línea de Aguas

1. Pretratamiento:

a. Separación de grandes sólidos:

Cuando se prevé la existencia de sólidos de gran tamaño o de una gran cantidad de arenas en el agua bruta, se debe incluir en cabecera de instalación un sistema de separación de estos grandes sólidos, este consiste en un pozo situado a la entrada del colector de la depuradora, de tronco piramidal invertido y paredes muy inclinadas, con el fin de concentrar los sólidos y las arenas decantadas en una zona específica donde se puedan extraer de una forma eficaz.

A este pozo se le llama pozo de gruesos, dicho pozo tiene una reja instalada, una serie de vigas de acero colocadas en vertical en la boca de entrada a la planta, que impiden la entrada de troncos o materiales demasiado grandes que romperían o atorarían la entrada de caudal en la planta.

La extracción de los residuos se realiza, generalmente, con cucharas anfibia o bivalvas de accionamiento electrohidráulico. Los residuos separados con esta operación se almacenan en contenedores para posteriormente transportarlos a un vertedero o llevarlos a incineración.

b. Desbaste:

Esta operación consiste en hacer pasar el agua residual a través de una reja. De esta forma, el desbaste se clasifica según la separación entre los barrotes de la reja en: Desbaste fino, Desbaste grueso, Reja de gruesos, Reja de finos.

c. Tamizado:

El tamizado consiste en una filtración sobre soporte delgado, y sus objetivos son los mismos que se pretenden con el desbaste, es decir, la eliminación de materia que por su tamaño pueda interferir en los tratamientos posteriores.

El tamizado es imprescindible cuando las aguas residuales brutas llevan cantidades excepcionales de sólidos en suspensión, flotantes o residuos. Cuando existen vertidos industriales importantes provenientes principalmente del sector alimentario (residuos vegetales, de matadero, semillas, cáscaras de huevo, etc.).

d. Desarenado:

El objetivo de esta operación es eliminar todas aquellas partículas de granulometría superior a 200 micras, con el fin de evitar que se produzcan sedimentos en los canales

y conducciones, para proteger las bombas y otros aparatos contra la abrasión, y para evitar sobrecargas en las fases de tratamiento siguiente.

e. Desengrasado-desaceitado:

El objetivo en este paso es eliminar grasas, aceites, espumas y demás materiales flotantes más ligeros que el agua, que podrían distorsionar los procesos de tratamiento posteriores, se efectúa mediante insuflación de aire, para desemulsionar las grasas y mejorar la flotabilidad.

Los desengrasadores separados del desarenado son aconsejables cuando se busca una mayor calidad del agua o cuando el agua proviene de ciertos tipos de industrias: Petroquímicas y refinerías de petróleo producen gran cantidad de aceites, los mataderos producen gran cantidad de grasas, etc.

2. Decantación Primaria:

En esta fase se separan la mayor parte de sólidos sedimentables y de material flotante que no pudieron ser eliminados en etapas anteriores.

Mediante una decantación física natural de los sólidos en suspensión y una flotación, también natural, de las partículas menos densas. Los sólidos se depositan en el fondo, mientras que las partículas se retiran mediante rasquetas giratorias en superficie. El agua decantada se vierte en un canal que la conduce hacia el tratamiento biológico.

3. Tratamiento Secundario:

El tratamiento secundario persigue la transformación de la materia orgánica disuelta en sólidos sedimentables fácilmente retirables del proceso (además de atrapar sólidos en suspensión y coloides restantes).

Si este proceso lo potenciamos utilizando reactivos químicos, hablamos de tratamiento físico-químico. Este proceso se divide en dos etapas, primero la coagulación y después la floculación. En estos tanques hay electroagitadores cuya velocidad hemos de controlar para asegurarnos de que los flóculos se agreguen sin romperse. Uno de los coagulantes más utilizados es el sulfato de aluminio.

Si en cambio optamos por un tratamiento biológico, ello consiste en hacer que microorganismos aeróbicos se alimenten de la materia orgánica presente en el agua, lo que nos permite separar el agua de la biomasa en la que se encuentran los microorganismos.

Para un correcto funcionamiento de un sistema biológico aeróbico, se requiere mantener un adecuado nivel de oxígeno (mediante electroagitadores superficiales o

inyección de aire), una correcta relación entre microorganismos (lodos existentes en el reactor), alimento (carga orgánica) y un adecuado tiempo de contacto para que los microorganismos realicen la degradación de la carga orgánica.

4. Decantación Secundaria:

La decantación secundaria o clarificación final se realiza con el objetivo de separar la biomasa del agua tratada. La función de esta etapa de tratamiento sirve tanto de clarificación, para producir un efluente bien tratado, como de espesamiento, para obtener una concentración suficiente en la extracción de fangos de mala calidad, casi siempre la causa son las materias en suspensión.

En el proceso de fangos activados, después de separar el agua tratada y la biomasa, es necesario reintroducir ésta en las cubas de aireación para mantener una concentración constante, con la deducción de la fracción en exceso; éste es el objetivo de la recirculación. Sin una recirculación bien diseñada y controlada, no puede optimizarse la decantación secundaria.

5. Tratamiento Terciario:

El tratamiento terciario se emplea para separar la materia residual de los efluentes de procesos de tratamiento biológico, a fin de prevenir la contaminación de los cuerpos de agua receptores, o bien, obtener la calidad adecuada para el reutilización. Existen diversos métodos destinados a este fin, entre los que se encuentran la ósmosis inversa, la electrodiálisis, la desinfección con cloro, la utilización de radiación ultravioleta...etc.

6.1.2 Línea de Fangos

1. Recirculación:

Como se ha mencionado en la decantación secundaria, es indispensable una buena recirculación de fangos, sobre todo entre la decantación secundaria y el reactor biológico para mantener una concentración constante y suficiente.

2. Espesamiento:

La etapa de espesamiento incluye para reducir el volumen de los fangos mediante concentración o eliminación parcial de agua, los fangos activados que normalmente se bombean desde los tanques de decantación secundaria con un contenido de sólidos del 0,8% pueden espesarse hasta un contenido del 4% de sólidos, consiguiéndose de esta manera una reducción del volumen del fango a una quinta parte del volumen inicial. Con ello se obtienen una serie de ventajas:

- Reducción del volumen de los tanques posteriores al espesamiento, así como su equipamiento.
- Reducción de la cantidad de calor requerida para el calentamiento de los fangos en procesos tales como digestión anaerobia, secado térmico e incineración.
- Reducción y mejora de los rendimientos de los equipos de deshidratación.

El espesamiento se suele llevar a cabo por medio de tres métodos, por gravedad, flotación o centrifugación (éste último método es de limitada aplicación).

3. Digestión o Estabilización:

El objetivo es disminuir el contenido de materia orgánica volátil y eliminar los microorganismos patógenos que contiene. Se realiza en tanques cerrados en los que intervienen sobre todo dos tipos importantes de bacterias, las acidogénicas y las metanogénicas. El primer tipo transforma la materia orgánica en productos intermedios como el ácido acético, el segundo tipo coge estos productos intermedios y los transforma en metano y subproductos estabilizados.

4. Deshidratación:

Antes de ser evacuados al exterior, los fangos se deshidratan para facilitar su manipulación. Como los fangos suelen ser en su mayor parte agua, cualquier eliminación de ésta disminuye significativamente el volumen de los fangos. Se suele recurrir a los métodos de filtración o centrifugación.

6.1.3 Línea de Gas

La línea de gas se encarga de aprovechar los gases obtenidos en la digestión anaerobia de los fangos para equipos instalados en la misma planta o incluso (si se dispone de motores) generar electricidad. El proceso de digestión anaerobia produce de 400 a 700 litros de gas por kilogramo de materias volátiles destruidas según sean las características del fango.

El gas generado en la digestión está compuesto principalmente de metano (en torno al 45-65%), de anhídrido carbónico (alrededor de 50-32%) y otros gases en menor proporción 1- 2 % (sulfuro de hidrógeno, nitrógeno, amoníaco, hidrógeno y oxígeno), dependiendo de las características específicas del licor que se trata.

El gas se recoge del digestor y por medio de unas tuberías se lleva hasta un gasómetro donde es almacenado. Más tarde es utilizado para alimentar las calderas de agua caliente que, mediante intercambiadores de calor agua-fango, comunicarán a éste la temperatura óptima para mantener el proceso de digestión.

En plantas depuradoras de gran tamaño, el gas producido en la digestión excede las necesidades para el calentamiento del fango, por lo que es posible emplearlo para otras finalidades. Una de estas posibilidades, la más usual hoy en día, es utilizarlo como combustible de alimentación a motores que hacen funcionar un generador de energía eléctrica para el aprovechamiento de la misma en la planta.

7 Digestión de Aguas Residuales

7.1 Proceso Aerobio

Procesos realizados por diversos grupos de microorganismos aerobios y facultativos, principalmente bacterias y protozoos que, en presencia de oxígeno actúan sobre la materia orgánica disuelta, transformándola en dióxido de carbono, agua y materias no degradables. También se oxida parte del amoníaco a nitritos y nitratos.

Los procesos de digestión aerobia se dividen en dos grandes grupos:

- Proceso de fangos activados: el cultivo se mantiene en suspensión.
- Procesos de película fija: los microorganismos se mantienen adheridos en un material de soporte.

7.2 Proceso Anaerobio

La digestión anaerobia es la degradación de la materia orgánica de los fangos en condiciones de anoxia. Las reacciones que se producen en esta degradación liberan energía además de liberar al medio metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O).

Aunque las reacciones anaerobias del tipo anterior no producen efluentes estables, existe un grupo específico de bacterias que pueden metabolizar los alcoholes, aldehídos y ácidos, produciendo CH_4 y CO_2 como productos finales.

7.3 Comparación entre los Procesos

Ventajas del Anaerobio frente al Aerobio:

- El fango resultante ocupa menos volumen (produce de 3 a 20 veces menos lodos que el proceso aerobio) y se puede secar más fácilmente que el de la digestión aerobia.
- Sirve como tratamiento de residuos contaminantes para disminuir malos olores y microorganismos patógenos y la degradación parcial de la materia orgánica, mejorando la calidad del agua residual que se vierte a los ríos o se infiltra al subsuelo.
- La eliminación de los contaminantes es comparable a la de los mejores tratamientos aerobios.
 - La DBO es reducida un 80%

- La DQO es reducida un 50%
- No hay que invertir en deshacerse de los organismos implicados en el proceso anaerobio.
- Debido al gas producido por la digestión, en el global del proceso se incurre en un balance energético positivo.
- Transformación de la materia orgánica en fertilizantes orgánicos de alta calidad.

Inconvenientes del Anaerobio frente al Aerobio:

- La digestión anaerobia está más limitada que la aerobia: en la digestión aerobia el factor limitante es el oxígeno, bastante abundante en la biosfera, mientras que las bacterias anoxigénicas deben controlar el pH de su medio (proceso difícil de realizar por las bacterias) y además esconderse del oxígeno.
- El proceso anaerobio requiere una inversión mayor debido a las complicaciones que conlleva un recipiente cerrado y conducciones para el gas. Entre ellas está la limpieza y control visual de dicho recipiente. El proceso anaerobio es de montaje más simple y de puesta en marcha más rápida.
- El proceso anaeróbico no permite realizar nitrificación de los compuestos como si lo permite el aerobio.
- En la digestión aerobia usamos muchas más bacterias, todas las que el sistema pueda permitir. En cambio la digestión anaerobia precisa de bacterias concretas, y muy coordinadas.
- Las metanobacterias son inhibidas por multitud de compuestos, tanto orgánicos como inorgánicos, naturales o antropomórficos. Y esa inhibición es causante de muchos de los problemas de los digestores. Esto hace que los procesos anaerobios sean más sensibles a los choques tóxicos.
- La digestión aerobia nos proporciona un mayor rendimiento. $Y = 0,4$ lo que quiere decir que de 1 gramo de materia orgánica se sacan 0,4 gramos de biomasa. Por su parte el rendimiento de la digestión anaerobia es: $0,04 < Y < 0,1$.

8 Proceso Anaerobio

8.1 Introducción

La digestión anaerobia es uno de los procesos más antiguos empleados en la estabilización de licores y ha sido universalmente aceptada como el método más adecuado para obtener un producto final aséptico.

En este proceso biológico, la materia orgánica contenida en la mezcla de licores, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en productos gaseosos o biogás compuesto por metano, dióxido de carbono como principales componentes, y además por hidrógeno, ácido sulfhídrico, etc., y en digestato, que es una mezcla de productos minerales nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y compuestos de difícil degradación.

El proceso se lleva a cabo en un reactor completamente cerrado. Los lodos se introducen en el reactor de forma continua o intermitente como es el caso de la parte experimental de este proyecto, y permanecen dentro de estos tanques durante periodos de tiempo considerables. El lodo estabilizado que se extrae del proceso tiene un bajo contenido de materia orgánica y de microorganismos patógenos vivos.

8.2 Naturaleza de los Lodos

Las características externas, como son el color, aspecto y olor pueden facilitar el conocimiento del estado del lodo.

El lodo fresco urbano es gris o amarillento con leves fragmentos reconocibles de heces, papeles y residuos de legumbres. Tiene mal olor y se deshidrata con dificultad. El agua combinada es turbia y huele. Los lodos secundarios tienen generalmente color pardo amarillento y rara vez huelen mal. El lodo digerido es negro y tiene un olor característico a alquitrán. El lodo estabilizado aeróbicamente tiene color marrón y huele a tierra.

En general los lodos urbanos se caracterizan por:

- A) Estar muy diluidos con porcentajes de agua superiores al 90% en el caso de lodos frescos o digeridos y entre el 70 y el 80% para lodos deshidratados.
- B) Por sus altos contenidos en materia orgánica (50 a 70%).
- C) Por contener materias proteínicas y otras sustancias orgánicas biodegradables.
- D) Contener en mayor o menor grado metales tóxicos.
- E) Contener microorganismos patógenos.
- F) Contener elementos nutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, etc. .

- G) Producir malos olores.
- H) Por su bajo poder calorífico. Sólo en ocasiones los lodos deshidratados pueden considerarse como combustibles.
- I) Por precisar gran cantidad de espacio, transporte y otros inconvenientes para su manejo en su evacuación o eliminación final.

8.3 Fases del Proceso

8.3.1 Hidrólisis

La materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles, que puedan atravesar la membrana celular. La hidrólisis es, por tanto, el primer paso necesario para la degradación anaerobia de substratos orgánicos complejos. La hidrólisis de estas partículas orgánicas es llevada a cabo por enzimas extracelulares secretadas por las bacterias fermentativas. La etapa hidrolítica puede ser la etapa limitante de la velocidad del proceso global, sobre todo tratando residuos con alto contenido en sólidos. Incluso en casos donde las fases acidogénicas o metanogénicas son consideradas como pasos limitantes, la hidrólisis puede afectar el conjunto del proceso.

Cualquier sustrato se compone de los tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos. La hidrólisis de cada tipo de compuesto se realiza por diferentes grupos enzimáticos.

El grado de hidrólisis y la velocidad del proceso dependen de muchos factores, entre otros del pH, de la temperatura, de la concentración de biomasa hidrolítica, del tipo de materia orgánica particulada, y del tamaño de partícula. Hills y Nakano (1984) demostraron que la tasa de hidrólisis depende, también, del tamaño de las partículas, debido fundamentalmente a la disponibilidad de superficie para la adsorción de las enzimas hidrolíticas. Los pretratamientos físico-químicos, cuyo principal efecto es la reducción del tamaño de las partículas, producen un aumento en la tasa de hidrólisis, y si esta fase es la limitante del proceso anaerobio, supone un beneficio para el proceso general, produciendo menores tiempos de retención y tamaños de reactor menores. La hidrólisis puede verse afectada por la presencia de algún compuesto que sea tóxico o inhibidor de la población bacteriana responsable de la producción de enzimas extracelulares.

8.3.2 Acidogénesis

Las moléculas orgánicas solubles son fermentadas por varios organismos fermentativos formando compuestos que pueden ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H₂) y compuestos orgánicos más reducidos (ácido láctico, etanol, ácido propiónico y ácido butírico, principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas a substratos que puedan utilizar las metanogénicas. Las proporciones entre los productos de la fermentación varían en función del consumo de H₂ por parte de las bacterias que utilizan hidrógeno. Cuando el H₂ es eliminado de forma eficiente las bacterias fermentativas no producen compuestos reducidos como el etanol, favoreciendo la producción de H₂ y la liberación de energía en forma de ATP.

La actividad de algunas bacterias fermentativas y acetogénicas depende de la concentración de H₂, siendo posible sólo a valores muy bajos de presión parcial de H₂. La eliminación continua de H₂ mediante oxidación por CO₂ (bacterias metanogénicas hidrogenotróficas) estimula la acción de las bacterias fermentativas, al eliminar un producto de la reacción. La ruta de degradación de la glucosa en los sistemas anaerobios proporciona como principales productos ácidos grasos volátiles, H₂ y CO₂.

8.3.3 Metanogénesis

Metanogénesis es la formación de metano por microbios. Es una forma de metabolismo microbiano muy importante y extendido. En la mayoría de los entornos, es el paso final de la descomposición de la biomasa.

Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización.

Las bacterias metanogénicas son las responsables de la formación de metano a partir de substratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H₂, CO₂, formato, metanol y algunas metilaminas. Todas las bacterias metanogénicas que se han estudiado poseen varias coenzimas especiales, siendo la coenzima M, la que participa en el paso final de la formación de metano.

Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del substrato principal, dividiéndose en los hidrogenotróficos, que consumen hidrógeno y fórmico, y los metilotróficos o acetoclásticos, que consumen grupos metilos del acetato, metanol y algunas aminas.

Diversos compuestos se han descrito como inhibidores del crecimiento de los microorganismos metanogénicos. Entre los más conocidos están el nitrógeno amoniacal, los ácidos grasos de cadena larga, ácidos grasos volátiles, algunos cationes, etc.

8.4 Factores que Influyen en el Proceso de Digestión

Anaerobia

8.4.1 Ambientales

8.4.1.1 Temperatura

La temperatura afecta de forma directa a la velocidad de descomposición de los residuos y al rendimiento del proceso (m^3 de biogás/kg de materia orgánica alimentada).

En función de la temperatura se pueden establecer tres rangos de operación:

A) Psicrófilo: inferior a 25°C.

La producción de biogás a temperaturas bajas se puede considerar independiente de la temperatura; sin embargo entre 15 y 25°C, la producción aumenta linealmente con la temperatura. A bajas temperaturas el proceso de aclimatación de los microorganismos es lento.

La digestión anaerobia en el rango psicrófilo se aconseja en ocasiones para el tratamiento de algunos residuos ganaderos e incluso vertidos industriales o urbanos, siempre que las condiciones ambientales no sean extremas.

B) Mesófilo: de 25 a 45°C.

En este intervalo de temperaturas trabajan la mayoría de los digestores. El óptimo de producción se establece entre 35-40°C o 35-42°C dependiendo del tipo de residuo a tratar, aunque en ocasiones puede situarse por debajo de 35°C.

Cuando se aumenta la temperatura de 25 a 40°C, la producción de biogás aumenta un 1% por grado. El balance energético óptimo se sitúa entre 25 y 35°C.

C) Termófilo: superior a 45°C.

La digestión anaerobia a temperaturas elevadas presenta ciertas ventajas como son la eliminación de gérmenes patógenos, mayor rapidez del proceso, disminución del tiempo de retención, reducción en las dimensiones de la instalación y un mayor rendimiento.

Para este intervalo, la temperatura óptima se sitúa alrededor de 60°C. Aunque la producción de gas se incrementa al pasar de 50°C a 60°C, el balance energético es más desfavorable.

En este rango de temperaturas se tratan generalmente residuos de industrias agroalimentarias que se vierten a altas temperaturas.

Se pueden distinguir dos tipos de bacterias diferentes: bacterias termotolerantes, que pueden crecer a 50-60°C y 30-35°C, y las bacterias termófilas estrictas que sólo crecen por encima de 40°C, presentando una óptima temperatura que ronda los 50°C .

La estabilidad de la temperatura es fundamental para el buen funcionamiento de un digestor en el rango márgenes de fluctuación son más estrechos en la zona termófila que en la mesófila, lo que exige de un control mayor en caso.

A pesar de las posibles ventajas de este proceso termófilo, en la práctica no ha tenido gran aceptación, debido probablemente a las siguientes razones:

- Las bacterias termófilas son muy sensibles a cualquier cambio en las condiciones del proceso.
- El período de aclimatación de las bacterias en el rango termófilo es relativamente largo.
- El rendimiento energético neto del proceso es pequeño, debido a pérdidas caloríficas en el mantenimiento del digestor a temperaturas elevadas.
- El poder fertilizante de los lodos digeridos es más pequeño.

8.4.1.2 pH

El pH del medio es función de la alcalinidad bicarbonatada, de la presión parcial del dióxido de carbono y de la concentración de los ácidos volátiles. Las bacterias acetógenas y metanógenas son muy sensibles al pH, por lo que habitualmente debe mantenerse entre 6,6 y 7,6; con un rango óptimo entre 6,8 y 7,2.

El valor del pH determina la producción total de biogás y su composición, ya que por debajo de pH = 6,2, la acidez del medio inhibe la actividad de las bacterias metanogénicas, y para valores de pH comprendidos entre 4,5 y 5,0, la inhibición afecta también a las bacterias fermentativas. Efectos similares se detectan para valores de pH superiores a 8,0-8,5.

La naturaleza y el pH de los residuos a tratar determinan el pH del medio. Algunos tienen una fuerte capacidad reguladora que es suficiente para mantener el pH dentro del rango favorable; en los casos en que esto no sucede se hace necesario añadir ácidos o bases.

En un proceso discontinuo o por cargas el pH experimenta al principio un descenso hasta un valor mínimo comprendido entre 4,5 y 6,0 según el tipo de alimento utilizado, iniciando a continuación un ascenso hasta los valores estables en donde se sitúa el óptimo. A partir de este momento se puede iniciar una alimentación continua o semicontinua por cargas periódicas

del digestor, e ir incrementándola gradualmente hasta un valor máximo que no provoque un descenso del pH por debajo del intervalo de régimen ya citado.

8.4.1.3 Alcalinidad

La alcalinidad es una medida del contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos de calcio, magnesio, sodio y potasio fundamentalmente; se expresa en mg CaCO₃/L, y representa la capacidad tampón del contenido del digestor.

Un digestor con una alcalinidad superior a 1000 mg/L (a pH 6 .0), presenta una buena capacidad de respuesta frente a rápidos aumentos en el contenido de ácidos volátiles. McCarty (1964) establece que para un valor de la alcalinidad comprendido entre 2500 y 5000 mg CaCO₃/L se obtiene un margen de operación seguro en el tratamiento anaerobio de residuos.

8.4.1.4 Ácidos Grasos Volátiles

El contenido en ácidos grasos volátiles en el interior de un digestor, es uno de los parámetros más útiles en el control del estado metabólico del proceso. Teniendo en cuenta que estos ácidos juegan un importante papel como intermediarios en la formación del metano, la acumulación de alguno de ellos indica la modificación de las condiciones metabólicas en el digestor; por tanto cualquier inhibición de las etapas finales de la metanogénesis provocará un aumento de la concentración de ácidos volátiles y un descenso acusado del pH.

El límite de concentración de ácidos volátiles para que el proceso sea estable varía según los datos encontrados en la bibliografía. Puede variar entre los 200 mg/L (referido a ácido acético equivalente) y los 2000 mg/L, concentración a la que se inhiben las bacterias metanogénicas pero no así las acidogénicas. No obstante este intervalo puede variar dependiendo del tipo de residuo a digerir, pues se han llegado a encontrar concentraciones superiores a los 5000 mg/L en digestores que funcionan normalmente cuando se alimentan con estiércol de gallina.

8.4.1.5 Potencial Redox

La medida del potencial redox de un sistema anaerobio es de considerable importancia cualitativa en el control del buen funcionamiento del proceso por cuanto es una medida del grado de anaerobiosis del medio. Diversos autores han observado una relación entre el potencial redox y el rendimiento de la digestión.

Para las bacterias metanogénicas el potencial redox óptimo varía aproximadamente entre -300 y -330 mV. Para mantenerlo en este intervalo es aconsejable que el digestor no reciba sustancias oxidantes y evitar la entrada de aire en la cámara de digestión.

8.4.1.6 Nutrientes

Generalmente las bacterias que intervienen en el proceso de fermentación anaerobia tienen requerimientos nutritivos simples para su desarrollo. Los principales nutrientes son carbono, nitrógeno, fósforo y pequeñas cantidades de azufre, vitaminas, ácidos grasos, aminoácidos (que pueden ser aportados por otras bacterias) y una serie de elementos minerales como K, Na, Ca, Mg y Fe en muy bajas concentraciones.

Cuando hay poco nitrógeno disponible en el medio, las bacterias no son capaces de producir los enzimas necesarios para utilizar el carbono. Si hay exceso de nitrógeno, entonces puede existir una inhibición del crecimiento de las bacterias. Se acepta una relación óptima de C/N/P del orden de 250/7/1, aunque pueda variar dependiendo del tipo de residuo.

Los residuos animales y lodos de aguas residuales urbanas contienen normalmente todos los nutrientes necesarios en cantidades adecuadas. Sin embargo las basuras municipales suelen ser deficitarias en nutrientes, pudiendo ser necesaria la adición de amoníaco, fosfatos o sulfuros cuando se pretende fermentarlas sin incorporar materiales de otros orígenes.

8.4.1.7 Inhibidores

Existen determinadas sustancias orgánicas e inorgánicas que pueden resultar tóxicas incluso en concentraciones muy bajas. Para las sustancias inorgánicas el nivel tóxico mínimo varía según que actúen solos o combinados con otros compuestos ya que algunas combinaciones tienen efectos sinérgicos mientras que otras presentan efectos antagónicos.

- *Oxígeno:*

Por tratarse de un proceso en el que intervienen microorganismos estrictamente anaerobios, el oxígeno resulta inhibitor a concentraciones muy bajas, del orden de 1µg/mL.

- *pH:*

Cuando el pH del medio alcanza valores fuera del rango óptimo de operación, puede inhibir el proceso metabólico de las bacterias metanogénicas y provocar un descenso del pH en un digestor. Las posibles causas pueden ser:

- caudal de alimentación demasiado alto.
- fluctuación amplia de la temperatura.
- formación de espumas.
- presencia de sustancias tóxicas.
- excesiva producción de ácidos volátiles.

- *Amoníaco:*

La toxicidad del amoníaco aparece influenciada por el pH del medio. A pH básicos los iones amonio se liberan como amoníaco. El problema de la toxicidad de éste se da en los períodos de aclimatación en digestores que tratan residuos avícolas y porcinos principalmente.

- *Cationes de metales alcalinos y alcalinotérreos:*

Cuando están presentes en concentraciones bajas favorecen el desarrollo de los microorganismos. Sin embargo para concentraciones elevadas presentan un efecto inhibitorio.

- *Cationes de metales pesados:*

La incorporación de cationes de metales pesados: Cu, Zn, Cd, Ni, Cr, Fe, etc. presenta generalmente efectos inhibitorios en los microorganismos. Para disminuir la toxicidad de los metales pesados, y considerando la baja solubilidad de los sulfuros de estos metales, se puede añadir el ion S²⁻ para precipitar Fe, Zn, Ni, Pb, Cd y Cu; sin embargo el Cr no forma sal insoluble.

- *Sulfuro de hidrógeno:*

El sulfuro de hidrógeno puede resultar tóxico en concentraciones comprendidas entre 70 y 200 mg/L. No obstante algunos organismos pueden tolerar concentraciones superiores a 200 mg/L después de un período de aclimatación, sin presentar efectos inhibitorios importantes.

- *Otros compuestos:*

Diversos compuestos orgánicos en pequeñas concentraciones como alcoholes, disolventes, antibióticos, fenoles, compuestos clorados (CCl_4 , CHCl_3), detergentes, pesticidas y algunos ácidos grasos de cadena larga (oleico, palmítico, esteárico) en grandes concentraciones, pueden inhibir la actividad de las bacterias metanógenas.

8.4.2 Operacionales

8.4.2.1 Agitación

La agitación de un digestor mejora el proceso ya que se consigue una mezcla homogénea y se facilita un contacto continuo entre los microorganismos y el sustrato, con un mejor aprovechamiento de éste al estar distribuido uniformemente y no aparecer gradientes de concentración o temperatura. Además la agitación evita la formación de espumas en la superficie.

Los tipos de agitación aplicada en los digestores pueden ser mecánica o neumática por recirculación del gas o líquido (éste último sistema ofrece más ventajas que el primero). La agitación mecánica consiste en la aplicación de un dispositivo de paletas o hélice dentro del digestor.

La agitación neumática por recirculación del gas consiste en inyectar de nuevo parte del gas producido, por la parte inferior del digestor con lo que se consigue la creación de un flujo turbulento en el interior; éste método proporciona una mayor producción de gas y una más rápida estabilización de la materia orgánica. La agitación neumática por recirculación de parte de la mezcla líquida contenida en el digestor por medio de una bomba, se aprovecha en ocasiones para calentar el digestor utilizando un intercambiador de calor externo.

La velocidad de agitación ha resultado ser un factor que influye en la producción de gas. Se ha comprobado que altas velocidades resultan ser perjudiciales ya que pueden romper los agregados bacterianos entre las bacterias productoras de hidrógeno y las que lo consumen, y los flóculos formados. En un digestor de lodos de aguas residuales, velocidades de agitación comprendidas entre 140 y 1000 rpm no afectaron sensiblemente a la producción de gas. Sin embargo cuando la velocidad era superior se observó una reducción de la cantidad de gas obtenido.

8.4.2.2 Tiempo de Retención Hidráulico

El tiempo medio de retención hidráulico (TRH) se calcula como el cociente entre el volumen del digester y el caudal alimentado.

El tiempo de retención de sólidos (TRS) se define como el tiempo medio que el sustrato alimentado permanece en el digester antes de ser eliminado como lodo digerido.

En un reactor de mezcla perfecta, sin recirculación de sólidos, el TRH coincide con el TRS. Si existe recirculación de sólidos el TRS es mayor que el TRH.

El tiempo de retención afecta a la velocidad de producción de gas. A igualdad del resto de condiciones, la eficacia de un proceso (% de sustrato alimentado convertido en biogás) aumenta con el tiempo de retención hasta un valor asintótico.

En la digestión anaerobia, como en otros procesos microbiológicos, la velocidad con que se generan los microorganismos es igual a la velocidad con que son eliminados del reactor cuando éste alcanza el régimen estacionario. Ello trae como consecuencia que el tiempo de residencia en un digester de mezcla perfecta debe ser superior a un valor mínimo para que el proceso se desarrolle.

Para el intervalo mesófilo de temperaturas, los tiempos de retención óptimos varían dependiendo del tipo de digester, de la degradabilidad del sustrato, de la temperatura y de los objetivos del tratamiento (producción máxima de metano o conversión completa del carbono orgánico y estabilización de los lodos digeridos).

En estudios realizados sobre la influencia del tiempo de retención en procesos de fermentación de lodos a 35°C se observó que las bacterias fermentativas que degradan los hidratos de carbono y proteínas hasta ácidos grasos, crecen rápida mente incluso para tiempos de retención menores de un día; sin embargo la fermentación de los ácidos grasos no se produce hasta que el tiempo de retención es igual o superior a cinco días debido al lento crecimiento de las bacterias acetogénicas.

8.4.2.3 Carga Volumétrica

La velocidad con que la materia orgánica (sustrato) es suministrada a los microorganismos que participan en la degradación del sustrato, es fundamental para poder mantener unas condiciones estables en la digestión. Se pueden aplicar diferentes cargas, alterando el caudal de alimentación que afecta al tiempo de residencia hidráulico en el digester, o alterando la concentración de la materia orgánica en el sustrato alimentado. Cuando la carga aportada es excesiva se crea una inestabilidad en el digester por la acumulación de los ácidos grasos volátiles.

La concentración de la materia orgánica puede ser determinada como Demanda Química de Oxígeno (mg O₂/L), como Sólidos Volátiles (g/L) y menos frecuentemente como Demanda Biológica de Oxígeno, Sólidos Totales o Carbono Orgánico Total.

Habitualmente se define la carga volumétrica como la cantidad de materia orgánica introducida en el digestor por unidad de volumen y tiempo (día); no obstante también se puede utilizar la carga volumétrica eliminada, que sería la cantidad de materia orgánica eliminada por unidad de volumen de digestor y tiempo.

La DQO es el mejor parámetro para expresar la cantidad de materia orgánica, químicamente oxidable, contenida en el sustrato, pero presenta la desventaja de que no da una idea de la cantidad de materia que puede ser no biodegradable.

La producción de gas por unidad de volumen de digestor aumenta al mismo tiempo que la carga volumétrica, hasta un cierto nivel. Si la carga es baja, la población bacteriana del digestor reduce su actividad metabólica por la limitación del sustrato, y la producción de metano también se reduce. Si se aumenta la carga excesivamente, la concentración de ácidos aumenta, y puede paralizarse la producción de gas.

8.4.2.4 Contenido en sólidos volátiles en suspensión. Cálculo de la biomasa.

La determinación de la cantidad de biomasa presente en un determinado material es muy difícil. No existe un método único, y universal para todos los tipos de fermentaciones, sino que se han desarrollado una serie de métodos de medida, que son aplicables según los casos.

Los factores que influyen a la hora de seleccionar el método adecuado son los siguientes:

- **Propiedades de la biomasa:** sus características filamentosas o particuladas, su facilidad de separación del medio de cultivo y su velocidad de crecimiento.
- **Propiedades del medio de cultivo:** viscosidad, color, presencia de sólidos o de materia disuelta capaz de reaccionar de la misma manera que la biomasa en el proceso de medida, y la presencia de productos almacenados en la biomasa.
- **Precisión, sensibilidad y rapidez de medida que se necesiten:** Los métodos de medida más utilizados generalmente, se pueden clasificar en tres grandes categorías:
 - a. **Métodos directos de medida del número de células:** recuento directo al microscopio, recuento por formación de colonias, recuento automático de células y el método del "Most Probable Number"(M.P.N.).
 - b. **Métodos directos de medida de la masa celular total:** medida de la masa celular seca y húmeda, medida de la turbidez y el método de medida de la masa celular por centrifugación.

- c. Métodos indirectos de medida de la masa celular: Se utilizan cuando hay un importante contenido en sólidos no celulares, cuando no se dispone de muestras representativas del contenido de todo el digestor o cuando no hay un método directo válido. El fundamento de estos métodos es la medida de un nutriente, de un producto o de un componente celular. La variación o existencia de cualquiera de ellos está relacionada estequiométricamente con la cantidad de biomasa presente en el digestor.

En los procesos de digestión anaerobia los métodos más utilizados son los siguientes:

- medida de la actividad de deshidrogenasa.
- medida del factor F_{420}
- medida del ADN.

La medida del factor F_{420} es un buen indicador de la concentración de biomasa metanógena presente.

La cantidad de ADN está relacionada con la cantidad de microorganismos vivos en cualquier circunstancia. Algunos trabajos han demostrado que el contenido en ADN de los lodos de un digestor anaerobio se puede relacionar con el contenido en sólidos volátiles en suspensión.

8.5 Tipos de Digestores

8.5.1 Reactor Discontinuo o por Cargas

En este proceso el material a digerir se introduce en el reactor y se desarrolla la fermentación hasta que cesa la producción de gas. Cuando la cantidad de microorganismos en la materia prima es pequeña, puede inocularse con lodos procedentes de otro digestor anaerobio, para acelerar la puesta en marcha.

Es un reactor muy sencillo de operación y diseño, con un mantenimiento económico, pero presenta inconvenientes ya que la cantidad de gas producido no es constante, con una composición variable y la primera parte no se puede aprovechar por el elevado contenido en CO_2 y aire. Además puede tener problemas mecánicos de carga o descarga.

En la actualidad se aplica en el tratamiento de residuos agrícolas o ganaderos con un elevado contenido de sólidos (por ejemplo excrementos de ganado vacuno).

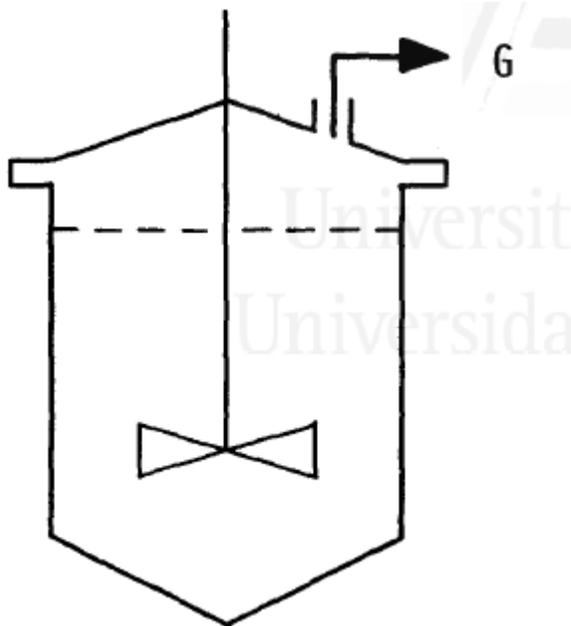


Figura: Digestor Discontinuo o por Etapas.

8.5.2 Reactor de Flujo de Pistón

Es un digester de funcionamiento continuo, generalmente de sección rectangular u ovalada en el que la circulación del residuo a tratar es horizontal en condiciones de mezclado longitudinal mínimo.

El sistema de agitación puede ser mecánico aunque normalmente se realiza por borboteo del mismo gas producido en la instalación. La calefacción puede ser por resistencia eléctrica, inyección de vapor o un serpentín por el que circula agua caliente.

Se han desarrollado dos tipos de digestores de flujo de pistón: de cubierta rígida flotante y de cubierta flexible fija, según sea la forma del depósito de almacenamiento de gas.

Este tipo de digestores son útiles para tratar corrientes con elevados porcentajes de sólidos (residuos animales y domésticos). Los mayores problemas que presenta son la limitación del volumen de digester (de 100 a 1000 m³ como máximo) y el elevado coste por la sofisticación del equipo si se le compara con un digester monoetapa convencional.

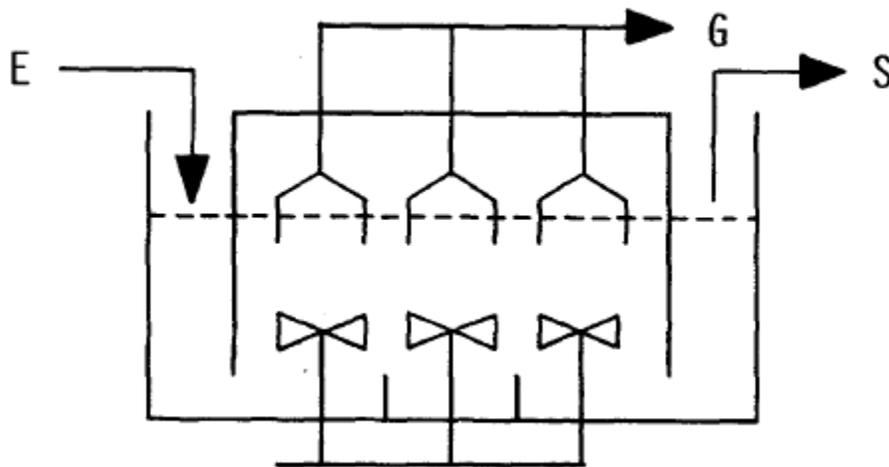


Figura: Digestor de Flujo Pistón.

8.5.3 Digestor Monoetapa o Tanque Agitado

Consiste en un reactor continuo de tanque agitado. Puede funcionar en régimen continuo o semicontinuo (alimentación y extracción periódicas). Se admite que la concentración de biomasa en la corriente de salida es la misma que en el interior del reactor. Este sistema es adecuado para el tratamiento de corrientes concentradas (2 - 8% de sólidos) con una cantidad significativa de sólidos no biodegradables.

La homogeneización del reactor se puede realizar mecánicamente o por recirculación del gas o líquido.

Su principal aplicación está en el tratamiento de los lodos procedentes de otros sistemas de depuración de aguas.

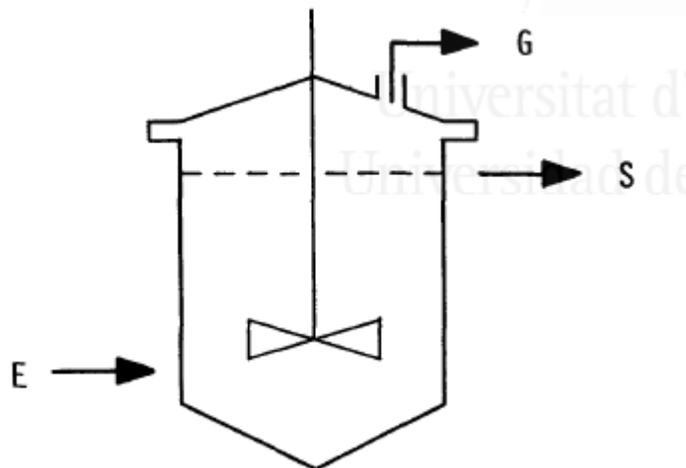


Figura: Digestor de Monoetapa o Tanque Agitado.

8.5.4 Proceso de Contacto Anaerobio

Consta de un digester monoetapa seguido de un decantador desde el que se recirculan los lodos al digester para aumentar la concentración de biomasa en el mismo. El tiempo de residencia hidráulico en el digester es inferior al tiempo de generación de los microorganismos. Por tanto se puede aumentar la carga orgánica máxima que puede admitir un digester monoetapa.

La homogeneización del reactor puede conseguirse recirculando parte del contenido del digester entre la zona superior e inferior, recomprimiendo el gas a la salida dejándolo burbujear dentro del digester, mediante agitación mecánica, etc.

Con el proceso de contacto anaerobio se pueden tratar corrientes con cargas medias o altas y con importantes cantidades de sólidos en suspensión. Se utilizan muy a menudo en el tratamiento de residuos agroalimentarios. La eficacia del proceso depende del sistema de decantación y recirculación de lodos.

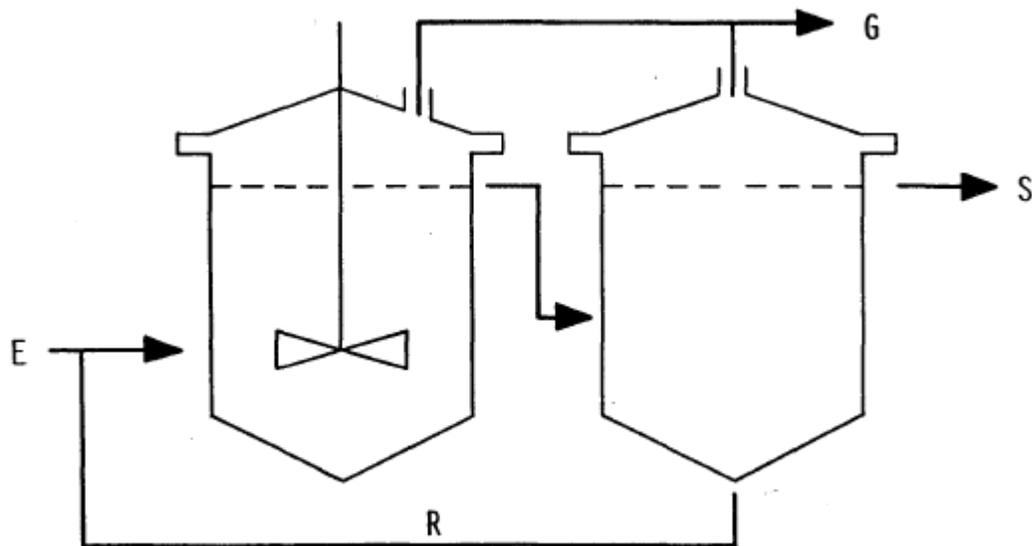


Figura: Digestor de Contacto Anaerobio.

8.5.5 Filtro Anaerobio

El reactor está relleno de un material sobre el que se adhieren los microorganismos. Cuando el número de bacterias crece excesivamente o cuando se mueren, se desprenden del soporte y abandonan el filtro como lodos.

Como relleno se pueden utilizar piedras, o elementos cerámicos o plásticos. La superficie específica de los soportes oscila entre 100 - 200 m². El flujo dentro del reactor es ascendente.

Los problemas más frecuentes que se presentan son los típicos de un reactor de lecho fijo: creación de caminos preferenciales, obstrucción en los distribuidores, colmatación de sólidos.

La aplicación de este aparato está indicada en el caso de pequeñas cantidades de sólidos en suspensión. Se pueden tratar incluso corrientes concentradas si se realiza una recirculación de la corriente de salida.

Con el filtro se consiguen rendimientos de depuración muy elevados. Se puede trabajar con cargas de 10 - 12 kg DQO/m³/día con elevados rendimientos de metano por volumen de digestor, debido a los altos tiempos de retención de sólidos que se logran.

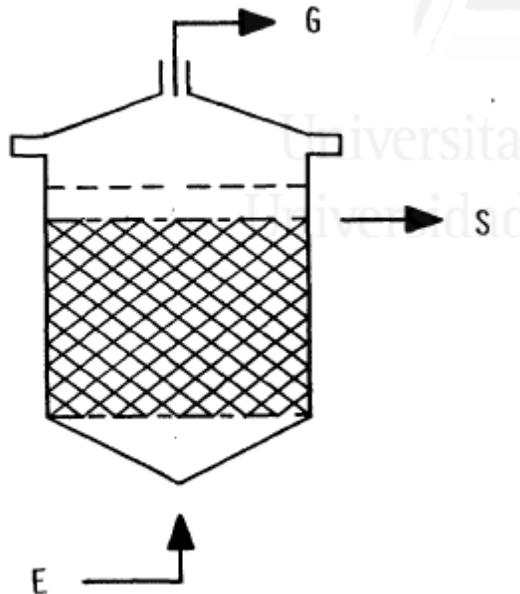


Figura: Digestor de Filtro Anaerobio.

8.5.6 Digestor de Lecho en Película

En este aparato la alimentación se introduce por la parte superior, eliminándose los problemas de colmatación y reparto de alimento que suceden en los filtros anaerobios.

El soporte sobre el que se retienen y crecen las bacterías puede tener distinta formas y ser de distintos materiales, observándose en cada caso distintas eficacias de depuración. Se puede aplicar este digestor para el tratamiento de todo tipo de residuos, urbanos o de animales.

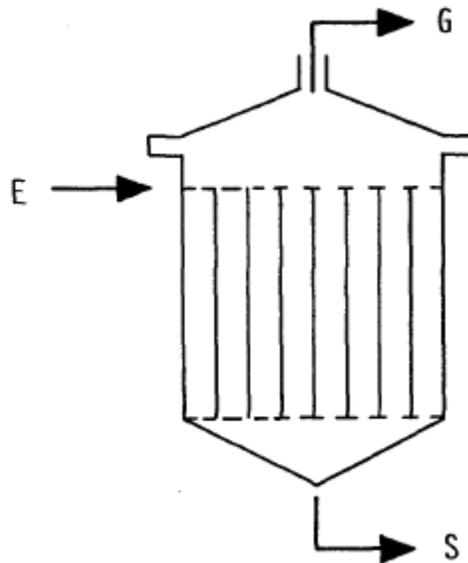


Figura: Digestor de Lecho en Película.

8.5.7 Digestor de Lecho Fluidizado

En este caso se fluidizan por la acción del efluente, los aglomerados bacterianos directamente o los soportes inertes sobre los que se han fijado las bacterias, generalmente partículas de arena, gránulos de plástico o carbón activado.

La superficie específica por unidad de volumen es de 1000 a 4000 m² en función del tamaño de las partículas. El proceso consiste en una circulación ascendente y recirculación parcial.

La eficacia del sistema es elevada ya que prácticamente todo el conjunto de bacterias están en contacto directo con la corriente a tratar, con lo que se reducen los problemas de difusión, se evita la formación de canales y la retención del gas.

Además se puede emplear un soporte de reducido tamaño con lo que se aumenta la superficie específica disponible. La concentración de biomasa suele ser superior al de otros sistemas anaerobios, por lo que se puede reducir el tamaño del reactor y el tiempo de residencia necesario para un determinado grado de depuración.

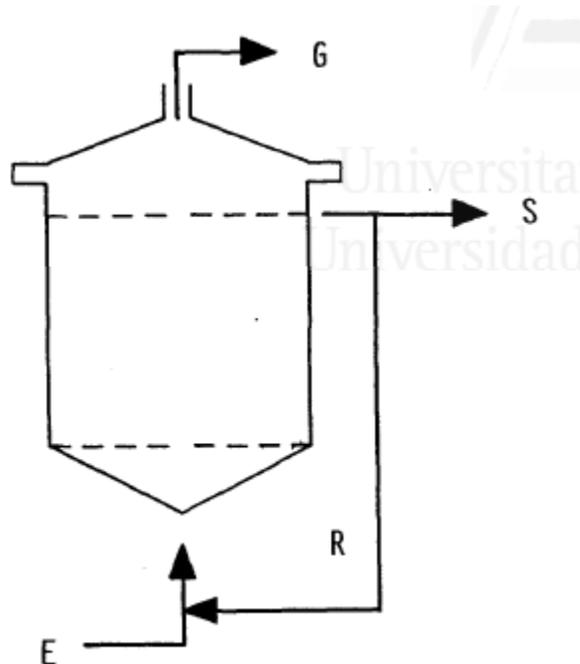


Figura: Digestor de Lecho Fluidizado.

8.5.8 Digestor de Lecho de Lodos

Este tipo de reactor ha sido desarrollado en Holanda por Lettinga y colaboradores. También se le conoce con el nombre de U.A.S.B. (Upflow Anaerobic Sludge Blanket).

Los microorganismos pueden actuar como medio filtrante y la corriente a depurar pasa en sentido ascendente a través del lecho de lodos anaerobios.

Por medio de un dispositivo especial se consigue la separación de los lodos, tanto del gas como de la corriente. Así se crea en la parte superior del reactor una zona de sedimentación que permite que las partículas de lodos que llegan a esta zona puedan flocular, sedimentar y volver a la zona de digestión situada por debajo. La retención de los lodos en el interior del sistema, se consigue favoreciendo la floculación si se mantienen unas condiciones apropiadas en el reactor.

Una de las características del proceso U.A.S.B. es la posibilidad de desarrollar unos lodos con actividad específica y mejores condiciones de decantabilidad. Ello se debe a que una parte importante del lodo anaerobio se produce en forma granular. La decantabilidad del lodo granular es mejor que la del lodo floculado. La capacidad de floculación del lodo se ha demostrado que depende de la presencia de cationes divalentes (los iones Ca^{+2} favorecen la floculación porque mejoran la resistencia mecánica de los gránulos) y de materia dispersa.

Con los digestores U.A.S.B. pueden tratarse con gran rendimiento, aguas residuales de industrias agroalimentarias, aunque recientemente también se ha aplicado al tratamiento de aguas residuales urbanas y residuos de destilerías.

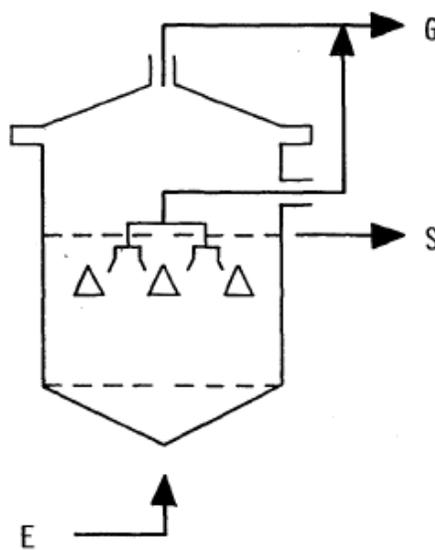


Figura: Digestor de Lecho de Lodos.

8.5.9 Reactor de Lecho Expandido

Consiste en un lecho de partículas muy finas (menores de 1 mm.) que se encuentran ligeramente expandidas por la acción de un flujo ascendente de la corriente a tratar, sin que llegue a fluidizarlas.

Las principales ventajas del sistema son: suministrar una gran área superficial para la fijación de los microorganismos; no presentar problemas de comparación ni formación de caminos preferenciales; ser más sencillo desde un punto de vista tecnológico en comparación con el de lecho fluidizado.

El reactor de lecho expandido se ha empleado con buenos resultados, en el tratamiento de aguas residuales con poca carga, a bajas temperaturas y con tiempos de retención relativamente cortos.

En relación con la estabilidad del proceso hay que destacar que variaciones instantáneas en las variables fundamentales, tienen un impacto mínimo en el rendimiento del reactor.

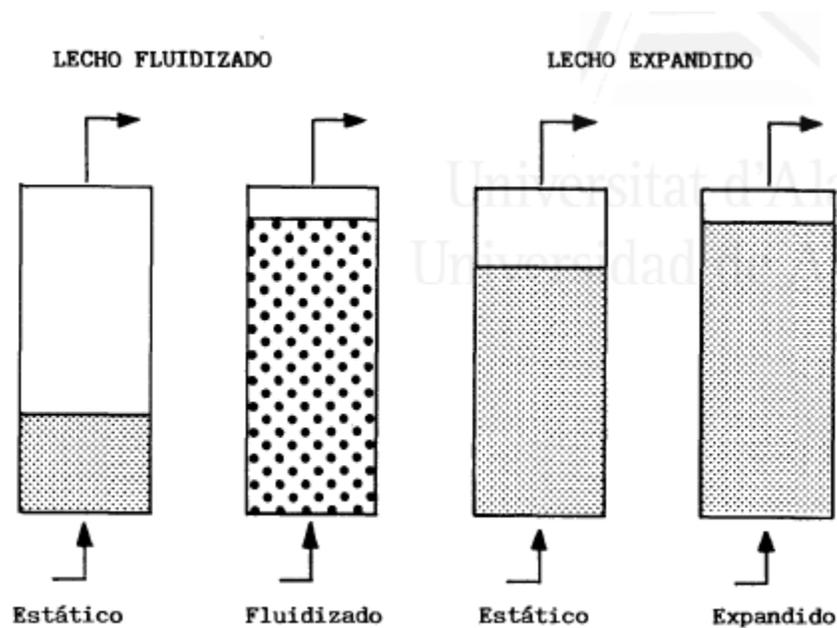


Figura: Comparación entre Fluidización y Expansión de un Reactor.

8.5.10 Digestión en dos Fases

Se trata de dos reactores en serie en los que se realiza separadamente la etapa acidogénica y metanogénica de la digestión anaerobia. En cada uno de los digestores están presentes los microorganismos responsables de cada etapa, que tienen características metabólicas propias.

Se pretende mantener en cada digestor unas condiciones de operación que determinan una velocidad de reacción máxima. Para conseguir esta separación de fases se puede emplear un control cinético, que consiste en aplicar sobre el digestor de acidificación un tiempo de residencia hidráulico inferior al tiempo de generación de las bacterias metanogénicas que es muy superior al de las bacterias productoras de ácidos. De esta manera en el primer reactor se consigue una conversión total del sustrato inicial en ácidos volátiles, mientras que en el segundo se utilizan estos compuestos para la producción de metano.

Teóricamente el proceso es atractivo puesto que permite lograr una mayor eficacia global de tratamiento y sobre todo una mayor estabilidad del sistema, pues en el segundo fermentador se mantiene una población bacteriana adaptada a la degradación de compuestos cuya acumulación hace que se produzca la desestabilización del digestor (en particular el ácido propiónico).

Desde un punto de vista tecnológico el proceso permite reducir el tamaño global del equipo y mejorar la calidad de la corriente de salida y la estabilidad del sistema.

En el caso de residuos con un elevado contenido de sólidos, aparece una modificación del proceso, conocida como digestión en dos etapas. Igual que en el caso anterior consta de dos reactores pero en el primero de ellos se realiza la hidrólisis de los sólidos formándose compuestos más sencillos. En el segundo reactor tiene lugar simultáneamente la acidificación y metanización.

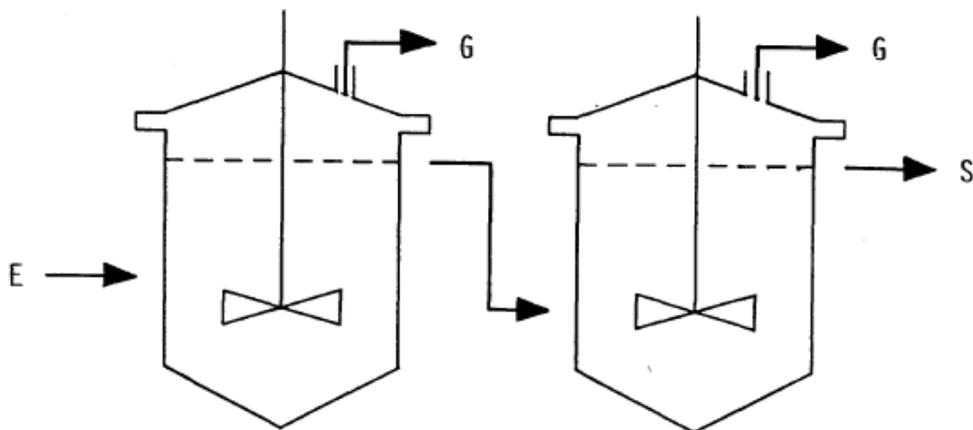


Figura: Digestión en Dos Fases.

8.5.11 Sistemas Mixtos

Cada tipo de digester es adecuado para tratar casos concretos de residuos. Asimismo para un mismo vertido se podría aplicar un sistema de tratamiento formado por dos tipos de digestores. El primero sería el más adecuado para tratar el residuo bruto directamente, mientras que el segundo se elegiría en función de las características de la corriente de salida del primero.

En el tratamiento de corrientes con cantidades importantes de sólidos en suspensión, un sistema podría ser el formado por un reactor de contacto seguido de un filtro anaerobio.

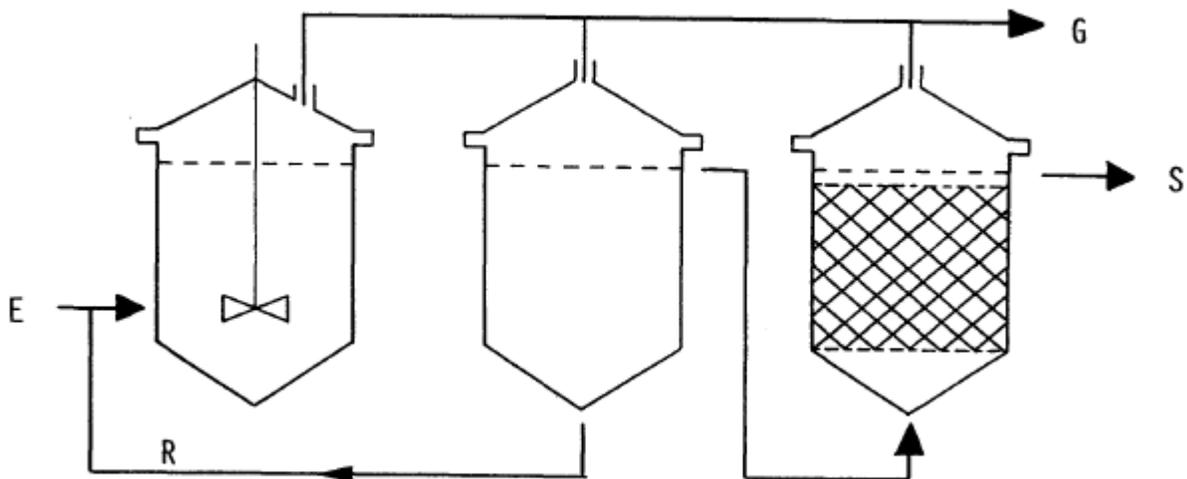


Figura: Sistema Mixto: Contacto y Filtro Anaerobio.

8.6 Biogás

8.6.1 Composición

El biogás producido por digestión anaerobia de residuos orgánicos es una mezcla de gases compuesta principalmente por metano y dióxido de carbono, con pequeñas cantidades de hidrógeno, nitrógeno, sulfuro de hidrógeno, oxígeno, monóxido de carbono y amoníaco. El biogás es incoloro, inflamable y quema con una llama de color azul.

Teniendo en cuenta que los principales componentes de los residuos orgánicos y otros materiales aptos para la fermentación metánica son los hidratos de carbono, las grasas y las proteínas, y siendo conocida la estequiometría de los procesos elementales que conducen a la formación de metano, es obvia la posibilidad de predecir la composición del biogás una vez conocida la composición de la materia prima. Dada la gran variabilidad en cuanto a la composición de los sustratos susceptibles de ser fermentados anaerobiamente, en la práctica la composición del biogás es muy variable.

Tabla: Composición Biogás y Propiedades de sus Componentes

	BIOGAS	CH ₄	CO ₂	SH ₂	H ₂	N ₂
Rango (% vol)	100	55-80	20-45	0-0.1	0-10	0.5-3
Valor medio (% vol)	100	70	30	0.1	--	--
Contenido energético (MJ/m ³)	27	38	--	--	12	--
Rango explosivo (% V/V aire)	6-12	5-15	--	4-46	6-71	--
Densidad (g/l a 0°C y 760 mm Hg)	1.09	0.72	1.98	1.54	0.09	--
Peso específico (referido al aire a 20°C)	--	0.55	1.52	1.18	0.07	0.97
Solubilidad en agua (% a 20°C)	--	3.38	87.8	258.2	1.82	1.54

8.6.2 Utilización

El biogás no suele licuarse porque resulta desventajoso económicamente sino es a gran escala. Normalmente se utiliza el gas conforme se produce, ya que su almacenamiento ocupa un volumen muy grande.

El biogás tiene un poder calorífico comprendido entre 20 y 28 MJ/m³, siempre inferior al del metano (37,3 MJ/m³) a causa de la presencia de gases inertes (dióxido de carbono y otros gases) y del grado de saturación de agua. Puede utilizarse directamente o después de ser sometido a un proceso de purificación que elimine el CO₂, SH₂ y vapor de agua, y lo transforme en un sustituto del gas natural con un 90 - 95% de metano. Cuando se utiliza únicamente como fuente de calor (calefacción, cocina, bombas de calor por absorción), se quema en su estado original. Si se dispone de una instalación previa de gas natural o propano, basta adaptar los quemadores a las características del biogás. Por el contrario, cuando se destina a la generación de energía eléctrica o mecánica, es indispensable su purificación.

La purificación del biogás comprende una etapa de separación del sulfuro de hidrógeno que puede consistir en una retención de este gas en un lecho de hidróxido férrico o simplemente de esponja de hierro; una segunda etapa de absorción del gas carbónico con soluciones de carbonato potásico o de etanolaminas, y una etapa final de separación de la humedad por simple enfriamiento en un serpentín de agua fría y por absorción en una columna con glicol o un lecho adsorbente.

La utilización del biogás como combustible para la tracción de vehículos es bastante discutible a causa del enorme peso de las botellas de gas comprimido: 400 kg para el gas equivalente a 32 litros de gasóleo.

Sin embargo, su uso en máquinas fijas de combustión interna, cobra cada día mayor importancia. Ello es debido sobre todo a que con una utilización conjunta de la potencia y el calor desarrollado por la máquina, este tipo de instalaciones permite un aprovechamiento de hasta un 90% de la energía contenida en el biogás. Hoy ya existen en el mercado máquinas que utilizan biogás con potencias comprendidas entre 15 y algunos centenares de kW.

La potencia desarrollada se utiliza para accionar bombas, compresores, máquinas frigoríficas, molinos, ventiladores, etc., bien directamente o previa su transformación en energía eléctrica. Al mismo tiempo el calor recuperado de la refrigeración de la máquina o de los humos de combustión, se utiliza para obtener agua o aire caliente utilizables en calefacción ambiental, secado de cosechas, etc. Por término medio 1 m³ de biogás produce 1,6-1,9 kWh de electricidad y 3,5 kWh de calor.

Una de las aplicaciones de mayor importancia del biogás es la calefacción de aire mediante bombas de calor. Tomando como término de comparación el consumo de una caldera que queme gas, se consiguen ahorros del 35% en sistemas funcionando por absorción, y del 50% por compresión mecánica. El que alguna de estas operaciones sean o no interesantes dependerá fundamentalmente de la composición y del poder calorífico del biogás obtenido.

La utilización del biogás exige una determinada capacidad de almacenamiento que permita absorber tanto las fluctuaciones de consumo como las de producción. La recogida y almacenamiento del biogás puede hacerse a baja presión (50 milibares), presión media (10-20 bar) y alta presión (200-300 bar). En el primer caso el gas se almacena en gasómetros, distinguiéndose entre los diversos tipos los que son independientes del digestor (que comunican con él por medio de una tubería) y los integrados en él formando su cubierta. Ambos tipos suelen ser de campana rígida o flexible. Para las instalaciones de tamaño medio (40 a 400 m³) el almacenamiento más económico es el de presión media. La reducción del tamaño del tanque compensa la necesidad de compresor, y el coste por m³ almacenado es considerablemente más bajo que en el caso de gasómetros a baja presión. El almacenamiento a alta presión no parece atractivo debido a los elevados costes que implica.

9 Desarrollo experimental

Este apartado es muy importante, puesto que de la fiabilidad y reproducibilidad de los resultados se ha de obtener la eficiencia de los mismos, y el entorno de aplicabilidad.

De esta forma, cabe mencionar que se establecen unos objetivos cuya consecución aporta a este proyecto de una manera práctica y ya no tan teórica la aplicabilidad real de la idea principal que se lleva en mente a lo largo de todo el trabajo. Estos objetivos se centran en la obtención de datos reales a partir de la experimentación para un posterior estudio y extracción de conclusiones, una búsqueda de tasa de generación de biogás en periodos cortos de residencia para el posible aprovechamiento energético, una factible adecuación y reducción de la carga orgánica del vertido que se trata para su incorporación al tratamiento tradicional proporcionando una más fácil degradación de la materia orgánica.

9.1 Equipos de Análisis

Reactor:

El Armfield Ltd. W8 es un digestor anaerobio empleado como una unidad de demostración a pequeña escala diseñado para que los resultados obtenidos puedan ser extrapolados a una escala industrial.

Este digestor cuenta con dos reactores de lecho empaquetado y caudal ascendente de 5 litros (re lleno con las biobolas: 4L) y sistemas de control de alimentación y temperatura para lograr una operación continua y estable de hasta siete litros diarios durante varios días.

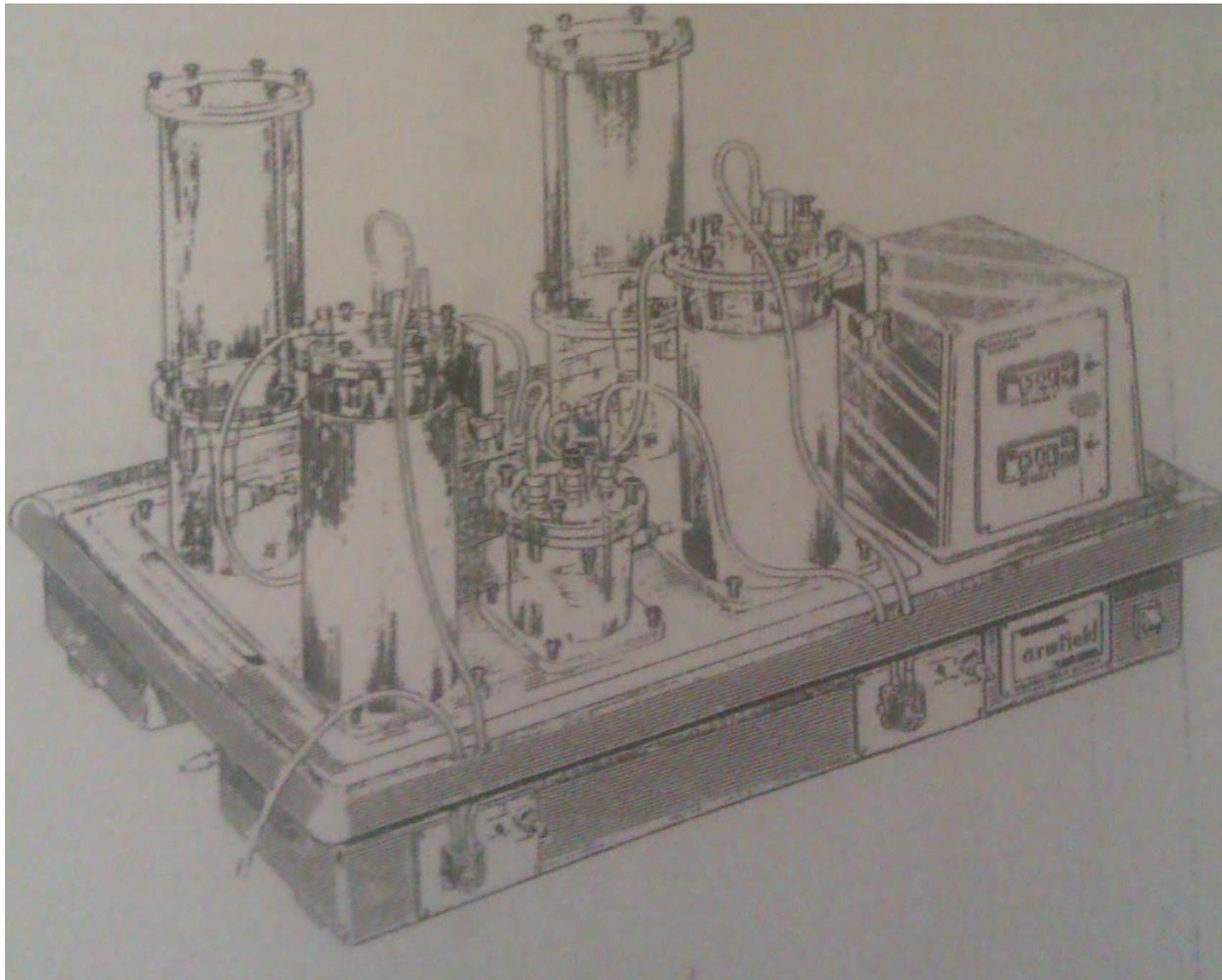
Los reactores pueden funcionar en serie o en paralelo. Un recipiente separador ubicado entre ambos reactores recibe el fluido excedente del primer reactor si el segundo está operando en serie pero, obviamente, con menor caudal. Unas bombas peristálticas calibradas gradúan y controlan el volumen de caudal hacia los recipientes. La temperatura dentro de cada reactor – cuya distribución se mantiene regulada en un margen de +/- 0,5°C- es controlada por una manta calefactora eléctrica que recubre su pared externa. En cada reactor puede regularse la temperatura en forma independiente desde ambiente hasta los 55°C.

La toma de gas en cada reactor es llevada hasta un colector con calibración volumétrica, que funciona por desplazamiento de agua. Un dispositivo de sellado líquido y altura de carga constante, asegura que la presión del gas del reactor se mantenga a un valor invariable durante el ensayo. El gas recogido puede evacuarse del recipiente y posteriormente, se puede llenar con agua durante otro ensayo sin romper el sello líquido.

Los puntos de muestreo para el líquido y el gas están distribuidos estratégicamente por los reactores. Existen válvulas de retención y sellos líquidos de sifón en las tuberías que aseguran la operación del reactor a un volumen constante evitando asimismo el ingreso de aire o el peligro de alguna acción sifónica accidental.

El equipo está montado sobre una base plástica formada al vacío con un canal de drenaje incorporado para soportar cualquier derrame o agua de lavado.

Figura: Reactor Armfield W8



Equipos e instrumentos:

- PH-metro GLP 22 Crison
- Espectrofotómetro Milton Roy, Genesis 5.
- Placa calefactora con agitador Delabo.
- Termorreactor Eco 16 Velp Scientifica
- Temporizadores
- Balanza digital Kern 440-35 N
- Bomba de caudal 3 L/h regulable
- Difusores
- Cronómetro

Material:

- Matraces aforados de 50, 100,200, 500 y 1000mL.
- Matraces Erlenmeyer de 100, 150, 250, y 500mL.
- Probetas de 50, 100 y 250mL.
- Buretas de 50mL.
- Pipetas graduadas de 5,10 y 50mL.
- Vasos de precipitados de 100, 250, 600 y 1000mL.
- Varillas de vidrio.
- Tubos de ensayo.
- Cubetas para espectrofotómetro.
- Viales de DQO.
- Termómetro de varilla
- Imanes para agitación
- Soportes de buretas
- Cuentagotas

- Espátulas
- Tubos de goma
- Juntas y codos para los tubos de goma
- Bandejas de PVC
- Botellas de plástico de 1,5 L.
- Garrafas de plástico de 8 L.
- Silicona
- Gradillas para tubos de ensayo
- Guantes de látex
- Pipeteadores
- Tapones de matraces aforados

9.2 Reactivos de Análisis y Materia Prima

Reactivos:

- Agua destilada
- Agua de red
- Ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4 98%)
- Hidróxido sódico (NaOH 1N)
- Sacarosa
- Hidrógeno carbonato de amonio (NH_4HCO_3)
- Dihidrógeno fosfato de potasio (KH_2PO_4)
- Hidrógeno carbonato de sodio (NaHCO_3)
- Hidrógeno carbonato de potasio (KHCO_3)
- Trazas de metal A
- Trazas de metal B

- Dicromato potásico ($K_2Cr_2O_7$)
- Sulfato de plata (Ag_2SO_4)
- Sulfato de mercurio ($HgSO_4$)
- Mezcla crómica
- Ácido clorhídrico (HCl)
- Potasa (KOH)
- Fango proveniente de un digestor de una E.D.A.R.
- Soluciones tampón de pH 7,02, 4,00 y 9,21.
- Crisolyt (KCl 3M)
- Fenolftaleína

Hidróxido Sódico 0,05N:

La disolución empleada en una determinación de ácidos grasos volátiles es de hidróxido de sodio al 0,05N. Se prepara tomando con una pipeta 5mL de hidróxido sódico 1N (extraído previamente de la botella y depositado en un vaso de precipitados) y se introducen en un matraz aforado de 100mL que se enrasa utilizando agua destilada y un cuentagotas para asegurar la precisión. Para una mejor acogida del hidróxido, es recomendable introducir una pequeña cantidad de agua destilada antes de depositar los 5mL antes mencionados. Ya que la disolución será preparada con bastante antelación a su uso, es necesario utilizar un tapón lo bastante ajustado al matraz como para permitirnos agitar la disolución justo antes de su uso.

Ácido Sulfúrico 0,05N:

Esta disolución se preparará de una forma similar a la anterior, sólo que al partir de ácido sulfúrico concentrado (98%), se realiza un paso intermedio que consiste en la elaboración de una disolución 1N que posteriormente se utiliza para un proceso idéntico al del hidróxido sódico del apartado anterior y desemboca en 100mL de una disolución 0,05N de ácido sulfúrico.

Para la preparación de la disolución 1N, utilizamos la fórmula:

$$N = \frac{\%pureza \cdot 10 \cdot densidad}{Peso\ específico}$$

Que nos dice que la normalidad del ácido concentrado es 36,8.

Con ella y la fórmula de:

$$N_0 \cdot V_0 = N_1 \cdot V_1$$

Calculamos el volumen que hemos de introducir de ácido concentrado para obtener una cantidad determinada de ácido 1N. En nuestro caso 0,027 litros para obtener un litro de la nueva disolución que introduciremos en el matraz aforado con la ayuda de una pipeta de 10 mL.

Agua de entrada:

La disolución que servirá de alimento para la planta piloto consiste en su mayoría de agua de red y sacarosa como principales ingredientes. Además se añaden hidrogeno carbonato de amonio, hidrógeno fosfato de potasio, hidrógeno carbonato de sodio, hidrógeno carbonato de potasio y trazas de metal A y trazas de metal B.

El depósito de alimentación puede contener 7,5L de disolución que presentarán una dco de aproximadamente 8000mg/L.

Cada uno de los reactivos se pesará utilizando la balanza y se introducirá en un vaso de precipitados de 1L dentro del cual añadiremos el agua de red y agitaremos con un imán y un agitador magnético hasta que todo quede bien disuelto. La disolución es vertida en el recipiente final y se completa su volumen utilizando agua de red.

Durante la experiencia optamos en muchos momentos por reducir la cantidad de agua de entrada que fabricábamos y por consiguiente utilizar recipientes más pequeños (recipientes de 4L para albergar 2 o 3 litros de agua de entrada). Esto fue debido a que descubrimos que a largo plazo grandes cantidades de agua de entrada dejadas mucho tiempo, bajaban el pH del agua de entrada y decidimos hacer agua de alimentación más a menudo.

Potasa:

La disolución empleada para capturar el CO₂ que sale de los reactores es hidróxido potásico al 0,05N. Se prepara pesando la cantidad adecuada de potasa y se introduce en un matraz aforado de 1000mL que se enrasa utilizando agua destilada y un cuentagotas para asegurar la precisión. Para una mejor acogida del hidróxido, es recomendable introducir una pequeña cantidad de agua destilada antes de depositar la potasa. Se introduce en el gasómetro que hemos construido empleando tubos de plástico y botellas de 1,5L de volumen, por las que burbujeará el gas, capturando la potasa el dióxido de carbono.

9.3 Métodos Analíticos

A continuación se describe cada uno de los ensayos utilizados en las determinaciones y posteriores cálculos de los parámetros de interés de la experiencia.

9.3.1 Caudal de Entrada

El caudal es una variable de vital importancia para el reactor, ya que nos permite averiguar la carga del lodo, el periodo de residencia en el reactor...etc. Define la velocidad superficial en el reactor, que condiciona la sedimentación y por tanto la retención de biomasa en el digester.

Este parámetro es medido gracias a la previa anotación del volumen que presenta tanto el tanque de alimentación como el tanque que recoge la salida del reactor. Estos depósitos albergan un volumen total de 8 litros cada uno, y contienen unas marcas que indican cada 0,5 litros para facilitar la lectura del volumen de líquido cada día.

El caudal se obtiene mediante un cociente. En el numerador figura la diferencia de volúmenes del depósito que contiene el alimento, es decir, el volumen inicial menos el volumen final del depósito. Por lo tanto la expresión es la siguiente:

$$Q = \frac{(V_0 - V_1)}{t} \left(\frac{L}{día} \right)$$

9.3.2 Caudal de Gas

La medida del gas es extremadamente importante, ya que a partir de ella calculamos el rendimiento del proceso (al ser el gas el producto final de la degradación anaerobia). Por ello merecen mención el mantenimiento y la vigilancia necesaria para que el gasómetro siga siendo estanco, lo que evita fugas del gas que sería muy perjudicial para la experiencia.

Para proceder a la medida de este caudal de gas primeramente se debe obtener el volumen de gas generado. Esta medida se realiza en el gasómetro que está conectado al reactor y es donde se acumula todo el gas. Se trata de un cilindro provisto de una cinta métrica colocada a lo largo de su altura. En el interior está repleto de agua que se desplaza a medida que se va

formando gas, por lo que el parámetro que a medir esta vez será la altura del líquido desplazado. Una vez obtenido este dato medido en el gasómetro y conociendo las dimensiones del mismo, es decir, el diámetro del cilindro de lo que viene siendo el gasómetro y el volumen que alberga en su interior, se puede calcular utilizando una simple relación directa. Por lo tanto, empleando la diferencia de niveles, es decir, de altura del líquido desplazado, se obtiene el volumen expresado en litros. La expresión quedaría de la siguiente forma:

$$V_{gas} = (h_0 - h_1) \cdot f \quad (L)$$

Siendo:

- f la constante que incluye los parámetros referentes al dimensionado del gasómetro.
- h_0 la altura del nivel inicial de líquido
- h_1 la altura del nivel final de líquido

Una vez obtenido este valor ya se puede hallar el caudal de gas generado, dividiendo ese volumen entre la unidad de tiempo correspondiente, en este caso días:

$$Q_{gas} = \frac{V_{gas}}{t} \quad \left(\frac{L}{día}\right)$$

9.3.3 Porcentaje de CO₂ y CH₄

Generalmente, el análisis de la composición del biogás se centra en concentración de metano. Los métodos más sencillos son los que utilizan la absorción de CO₂ por borboteo en una solución fuertemente alcalina. Se considera en este caso que el volumen complementario corresponde a metano. Ejemplos de este procedimiento son los sistemas más sencillos de borboteo y los aparatos de Orsat, en los que, además, puede comprobarse la medida, precediéndose a la combustión del metano y determinando posteriormente el CO₂ producido. La concentración de metano también puede ser medida de otras formas como por medio de detectores catalíticos de los utilizados comúnmente en detectores de fugas de gases o por medio de metanímetros industriales de los utilizados en minería. También es posible el uso de la cromatografía de gases, pudiendo determinar la composición del gas y la concentración de cada uno de sus componentes.

En el caso de esta experiencia se usará el mecanismo de absorción de CO₂ por borboteo en una solución saturada de hidróxido de potasio, ya que es el método más sencillo, rápido y práctico para las pretensiones de este proyecto. De esta forma, el biogás que se encuentra en el gasómetro se hará pasar por dos borbotadores en serie que contienen esa solución de potasa ya mencionada. A continuación, el gas que salga de los borbotadores se alojará en un colector donde se podrá medir el volumen de metano mediante otro mecanismo de desplazamiento de líquido por el propio gas. En resumen, el biogás pasará a un borbotador donde se producirá una primera absorción de dióxido de carbono, seguidamente el gas pasará a un segundo borbotador para asegurar que todo el CO₂ queda absorbido por la solución alcalina y por último el metano se recogerá en un colector dispuesto para medir su volumen.

El colector de metano que se encuentra inmediatamente conectado a los borbotadores tiene unas determinadas dimensiones al igual que el gasómetro tiene otras, las cuales afectan a una constante con la finalidad de obtener el cálculo previsto.

A partir de estas dimensiones, se toma nota de la altura inicial y final que marca el nivel de agua dentro de este colector antes y después de la recolección de gas. Por lo tanto, la diferencia de alturas indicará el volumen de agua desplazado por el metano. La expresión es un cálculo de nuevo de relaciones directas conociendo los datos ya mencionados:

$$V_{CH_4} = (H_0 - H_1) \cdot f' \quad (L)$$

Siendo f la constante obtenida a partir de las dimensiones del colector de metano.

Mediante la diferencia entre el volumen de gas generado y el volumen de metano calculado se obtiene el volumen de dióxido de carbono que contiene el total de gas recogido en el gasómetro.

$$V_{CO_2} = V_{gas} - V_{CH_4} \quad (L)$$

Tras calcular este volumen, obtener el porcentaje de metano que está presente en el total del biogás generado es un simple cálculo que viene representado en la siguiente ecuación:

$$\%CH_4 = \frac{V_{CH_4}}{V_{gas}} \cdot 100$$

9.3.4 Temperatura

La temperatura de operación del digestor, está considerada uno de los principales parámetros de diseño, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaerobia. A su vez, también se ve directamente afectado tanto el rendimiento del proceso como algunos aspectos físico-químicos del mismo.

Por todas estas razones es otro parámetro a controlar diariamente. Puesto que el sistema empleado para mantener una temperatura constante se ha programado al poner en marcha la planta piloto con la ayuda de una serie de verificaciones, únicamente será necesario comprobar que el automatismo marca la temperatura programada (35°C) dentro del rango mesofílico. Por lo tanto lo importante de este paso es corroborar que la temperatura permanece constante en los reactores y es de 35°C a lo largo de toda la experiencia.

9.3.5 Toma de Muestras

La toma de muestra de agua es una operación delicada, que debe llevarse a cabo con cuidado, dado que condiciona los resultados analíticos y su interpretación. De una manera general, la muestra debe ser homogénea y representativa, además de mantener las características fisicoquímicas o biológicas del agua. Los recipientes a utilizar requieren un tratamiento previo de limpieza y esterilización.

Se efectuará una toma de muestra de agua en la corriente de entrada y otra en la salida para estudiar y calcular el rendimiento de depuración que lleva a cabo el reactor a lo largo del transcurso de los días.

La muestra de la corriente de entrada se tomará con ayuda de una pipeta de 50 mL con la que se pipetearán dos tandas de 50 mL del mismo tanque donde se encuentra esta disolución y serán depositados en un matraz Erlenmeyer de 100 mL el cual se cerrará ajustando un pedazo de parafilm a la boca del matraz.

Las muestras de los reactores se tomarán poniendo en marcha la bomba correspondiente y después de haber dejado correr durante un corto periodo de tiempo el agua que pudiera haber quedado retenida en el tubo de salida, se extraerán unos 75 mL aproximadamente en un matraz Erlenmeyer de 100 mL.

Una vez se tienen las muestras que van a ser analizadas, se destinarán 10 mL para el ensayo de determinación de DQO, y 50 mL para determinar los ácidos grasos volátiles y la alcalinidad.

9.3.6 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno, DQO, por su reproducibilidad y relativa rapidez, es la variable más utilizada en el control y gestión de un reactor anaerobio.

Para proceder al ensayo de la determinación de DQO, se rotula cada uno de los matraces para identificar el origen del que proviene la muestra, se pipetea 10 mL de cada una de las muestras iniciales con ayuda de una pipeta de 10 mL y son vertidos en un matraz aforado de 100 mL que contiene unos mililitros de agua destilada para evitar el choque directo de la muestra contra el vidrio del matraz. Una vez añadida la muestra en su respectivo matraz se diluye hasta los 100 mL que marca el aforado con agua destilada obteniendo una dilución de la muestra inicial al 10% en volumen.

Seguidamente se prepararán dos vasos de precipitados de 600 mL, uno de ellos contendrá agua destilada y el otro será utilizado para verter los residuos líquidos en él.

Esto servirá de ayuda a la hora de enjuagar y limpiar la pipeta de 5 mL que utilizaremos para preparar los viales de DQO.

Sirviéndose de una gradilla colocaremos en ella tres tubos de DQO por cada muestra que vayamos a analizar más otros tres que irán destinados para obtener el blanco de la lectura espectrofotométrica, por lo que serán preparados con agua destilada.

Cada vial de DQO al contener una disolución ácida concentrada hace imprescindible el uso de equipos de protección individual como gafas y guantes de látex, así como prestar el máximo cuidado y atención a la hora de prepararlo y añadir la muestra.

El siguiente paso es el de añadir la muestra diluida preparada anteriormente, en cada uno de los viales de DQO. Para ello se prepara el vial desenroscándole el tapón. Se pipetea 5 mL de la muestra preparada y previamente agitada para su completa homogeneización, para así obtener resultados a partir de una muestra representativa de la original. Se vierte cuidadosamente en el tubo de forma que resbale por la pared del mismo y nunca la boca del tubo ha de estar orientada hacia el propio cuerpo de la persona que realiza el ensayo como método preventivo de seguridad. A continuación se tapa el tubo con su respectivo tapón y se agita continuamente su contenido hasta la completa homogeneización de la mezcla, teniéndolo tomado por la parte superior, es decir por el tapón, ya que al mezclarse la disolución contenida con la muestra se produce una reacción exotérmica y el vial se calienta de manera brusca. Por último se etiqueta y coloca el tubo en un lugar del termorreactor que se pone en funcionamiento una vez estén todas y cada una de las muestras preparadas.

Con el fin de preparar la siguiente muestra, primeramente se procederá a enjuagar y limpiar la pipeta ayudándonos del vaso de precipitados con agua destilada y el destinado a residuos. Una vez perfectamente limpia, se prepara la muestra del mismo modo que se ha explicado en el párrafo anterior, y así hasta completar todos los muestreos preparados. Al final han de

completarse hasta un total de seis muestras más las tres de agua destilada, que servirán como blanco para la lectura espectrofotométrica, colocadas en el termorreactor.

Se pone en funcionamiento el termorreactor a 148°C durante 120 minutos para que se produzca la reacción y finalizado ese periodo de tiempo se puede proceder a la medida de la DQO mediante el método fotométrico utilizando el ya mencionado espectrofotómetro.

Para tomar el valor de absorbancia que nos da el espectrofotómetro se prepara un vaso de precipitados para verter los residuos, las cubetas que serán introducidas en el aparato y las muestras a analizar.

Como inicio se toma un vial de DQO que contenga la muestra para el blanco y se traspasa su contenido a una cubeta que debe estar perfectamente limpia. Ésta se introduce en el espectrofotómetro el cual previamente se ha configurado con una longitud de onda de 593 nm y se mide su absorbancia indicando que ésta es la que tomaremos como cero para el resto de muestras. Seguidamente se trasvasa el contenido de un tubo que contenga una de las muestras a analizar y se opera del mismo que con la muestra de blanco. Se anota el dato de absorbancia, se limpia la correspondiente cubeta desechando su contenido en el vaso de residuos, enjuagando y secándola totalmente para ser utilizada en la siguiente medición. Los residuos de DQO se almacenan en unos contenedores especiales para facilitar su recogida como residuo químico, ya que es un producto contaminante.

La DQO se calcula mediante la ecuación obtenida a partir de la realización de una recta de calibrado que asocia una determinada absorbancia (eje de abscisas) a un valor concreto de DQO (eje de coordenadas). Para nuestro caso la ecuación que define la recta de calibrado utilizando como dilución patrón ftalato potásico y con un $R^2 = 0,9973$ es la siguiente:

$$\text{DQO} = (1881,4 * \text{absorbancia}) - 17,747 \quad (\text{mg/l})$$

El resultado que se obtenga de esta ecuación deberá ser multiplicado por 10 debido a que la solución preparada de la muestra extraída se diluye al 10% para que se encuentre dentro del rango de absorbancias empleado.

Una vez obtenido el dato real de concentración de DQO, se pueden hallar otra serie de parámetros que dan una información complementaria importante para el estudio del comportamiento del reactor.

Uno de estos parámetros es la carga orgánica que viene dada por la expresión:

$$\text{Carga orgánica} = \text{DQO entrada} * Q \quad (\text{mg/día})$$

Otro de los parámetros importantes cuya determinación es esencial para obtener el rendimiento del reactor, es la reducción de DQO. Ésta se expresa en porcentaje y hace referencia a la cantidad de materia orgánica que ha sido digerida en el mismo reactor anaerobio. Por ello se

debe conocer tanto la DQO de entrada como la de salida, para tener una diferencia que nos permita obtener el valor de este parámetro. La expresión es la siguiente:

$$\text{reducción de DQO} = \frac{DQO_{\text{entrada}} - DQO_{\text{salida}}}{DQO_{\text{entrada}}} \cdot 100$$

Por último, otro parámetro relevante es el caudal de metano esperado basándonos en la reducción de la DQO. Es un parámetro que hemos de comparar al real, medido directamente. Se calcula de la siguiente manera:

$$Q_{CH_4 \text{ esperado}} = (DQO_{\text{entrada}} - DQO_{\text{salida}}) \cdot Q \cdot \frac{T + 273}{273} \cdot P \quad \left(\frac{L}{\text{día}}\right)$$

Siendo P una constante que equivale a 350 ml/g que corresponde a la degradación de la DQO en condiciones normales.

9.3.7 pH

El valor de pH es un valor global indicativo de la presencia de ácido, sin que se tenga en cuenta su naturaleza, grado de disociación, etc., es decir, representa la acidez/basicidad del medio. Depende en gran parte del equilibrio del carbono inorgánico (dióxido de carbono/bicarbonato/ácido carbónico), que define la capacidad tampón (de autorregular el pH) del afluente.

Las bacterias se desarrollan favorablemente en entornos neutros o ligeramente alcalinos. Un digestor con alta concentración de ácidos volátiles precisará de alguna sustancia que incremente el valor del pH, ya que no deberá caer por debajo de 6,2 u pH, puesto que crearía un medio tóxico para las bacterias metanogénicas e inhibiría el proceso.

El ácido acético, propiónico y butírico son ácidos de igual fuerza o ligeramente superior a la del ácido carbónico. A pH 7, todo el ácido volátil se encuentra en forma de sal. Con pH mayor a 7 se tiene ácido carbónico, bicarbonato y acetato. Con pH comprendido entre 4,1 y 7, el equilibrio ácido-base se caracteriza por la presencia de bicarbonato, de ácido carbónico, de acetato y de ácido acético.

Cuando los ácidos volátiles aumentan en el líquido de los fangos de un digestor, una parte de estos ácidos se transforma en sales por la acción sobre el bicarbonato, que constituye una reserva alcalina. El pH disminuye de forma menos acusada, cuanto mayor es la reserva alcalina.

El método más empleado para medir el pH de un agua es la potenciometría con electrodo de vidrio y es el método empleado en este proyecto.

Inicialmente se calibra el Phmetro con los tampones de pH 7, 4 y 9.

Se pipetea 50 mL de la muestra inicial y se vierten en un vaso de precipitados de 100 mL. Con este volumen de muestra se realiza la medida de pH con ayuda del pH-metro calibrado. Se coloca un imán en el vaso que contiene la muestra y se sitúa en el agitador del pH-metro.

A continuación se pone en funcionamiento el mismo programado de forma continua y se sumerge el electrodo, con el fin de obtener el resultado de pH a medida que transcurre el tiempo, de un modo continuado. Una vez que se estabiliza el valor de pH en la pantalla se anota este dato y será el que figure como el correspondiente a dicha muestra. Las demás muestras se analizan del mismo modo.

Entre el análisis de una muestra y otra, cabe mencionar que el electrodo debe estar limpio y seco con la finalidad de no contaminar las muestras y obtener valores de pH que no se corresponden con el real.

9.3.8 Alcalinidad

La alcalinidad es una medida del contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos de calcio, magnesio, sodio y potasio fundamentalmente, se expresa en mgCaCO₃/L, y representa la capacidad tampón del contenido del digestor.

A los pH que funciona un reactor anaerobio, la única mezcla reguladora es la compuesta por el ión bicarbonato y el ácido carbónico en solución. Esta mezcla es activa entre pH comprendidos entre pKa ±1 esto es entre 5,34 y 7,34. Valorar la capacidad reguladora del bicarbonato a pH tan bajos no lleva a valores de alcalinidad útiles a efectos de controlar la operación del reactor. Además existe la opción de llegar a valorar parte de los AGV presentes en solución como sales, cuyos pKa están comprendidos entre 4,56 y 4,67. Como en nuestro caso el pH en el interior del reactor es inferior a 5,75, no obtendremos valores de alcalinidad, pero aun así se efectúa su análisis en las muestras de entrada y la salida del reactor.

A partir de la muestra de la que hemos medido el pH (50 mL.), y con ayuda del pHmetro se valora dicha muestra tomando como punto final 5,75 u pH, anotando el volumen gastado de valorante. El valorante utilizado es ácido sulfúrico 0,05 N, que añadiremos al vaso de

precipitados que contiene la muestra, con la ayuda de una bureta. La alcalinidad se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{Alcalinidad} = \frac{V_{H_2SO_4} \cdot N_{H_2SO_4} \cdot PM_{CaCO_3}}{V_{muestra} \cdot 2} \quad \left(\frac{mgCaCO_3}{L}\right)$$

9.3.9 Ácidos Grasos Volátiles (AGV)

Este parámetro es uno de los más utilizados en los sistemas de control debido a su rápida respuesta ante variaciones del sistema. Un ejemplo de ello, es la acumulación de ácidos grasos volátiles que tiene lugar en el sistema cuando la velocidad de degradación de éstos, por parte de las bacterias responsables, disminuye por alguna causa adversa. Estos ácidos juegan un papel importante como intermediarios en la formación del metano y cualquier inhibición de las etapas finales de la metanogénesis provocará un aumento en su concentración y un descenso acusado del pH.

Existen diferentes métodos para la determinación de AGV en un agua residual, de entre los métodos más utilizados en la práctica, el idóneo para la experiencia es el diseñado por Di Lallo. Consiste en una valoración por retroceso de la muestra empleada para la alcalinidad. Se valora con ácido sulfúrico 0,05 N hasta pH 3,3. Se elimina el CO₂ por ebullición y se valora por retroceso con una solución valorada de NaOH 0,05N hasta que se produce el cambio a rosa debido a la fenolftaleína (pH 8,2). Esta medida es también no-específica, pero es indicadora de los AGV exclusivamente.

Otro método destacable es la cromatografía de gases, que es el sistema más usado y el que permite el conocimiento no sólo de la cantidad sino de la concentración de cada uno de los ácidos existentes. El método es muy rápido, pero requiere de la instrumentación y de cierta manipulación de la muestra, por lo que no resulta sencilla su automatización.

El cálculo de este parámetro puede expresarse en miligramos de carbonato cálcico por litro, o en miligramos de ácido acético por litro como muestran las siguientes expresiones:

$$AGV = \frac{V_{NaOH \text{ entre pH4 y 7}} \cdot N_{NaOH} \cdot PM_{CaCO_3}}{V_{muestra} \cdot 2} \quad \left(\frac{mgCaCO_3}{L}\right)$$

$$AGV = \frac{V_{NaOH \text{ entre pH4 y 7}} \cdot N_{NaOH} \cdot PM_{HAc}}{V_{muestra} \cdot 1} \quad \left(\frac{mgHAc}{L}\right)$$

9.4 Puesta en Marcha y Procedimiento Operacional

Para la puesta en marcha de la planta piloto, se hicieron necesarias una serie de comprobaciones, ajustes y verificaciones a modo de obtener un correcto y adecuado funcionamiento una vez se le diera entrada al inóculo de fango en el reactor y comenzará la experiencia de la cual se efectuará un posterior estudio.

De esta forma, en un principio se llenó el reactor con agua destilada poniendo ya en marcha la bomba que facilita la entrada de la corriente. Una vez llenado, se realizaron pruebas de estanqueidad para asegurar que el reactor no tuviera fugas ni pérdidas de líquido y comprobar que llega a ser totalmente hermético a fin de que una posible intrusión de oxígeno no perjudique el funcionamiento del mismo.

Del mismo modo se comprobó que el gasómetro también fuera al igual que el reactor, herméticamente cerrado, ya que de no ser así, se podría perder parte del biogás producido y por lo consiguiente, los posteriores análisis de gases no serían completamente fiables y reales. Para realizar esta prueba se llenó el gasómetro con agua hasta su total capacidad y con ayuda de un compresor se le fue introduciendo aire, el cual se observó que efectivamente desplazaba el agua. Del mismo modo se observó que de ninguna manera se producían pérdidas por ninguna junta del mismo tanque.

Una vez comprobada y verificada tanto la estanqueidad del reactor como la de gasómetro, se dio paso a la verificación de la temperatura a la que se encuentra el contenido del reactor. Para ello se puso en marcha la sonda fijada en el interior del reactor y la manta calefactora que rodea el mismo y que ayuda a mantener una misma temperatura prefijada. Se introdujo en el dispositivo controlador una temperatura de consigna de 35° C. Pasado un cierto tiempo para que todo el reactor alcanzará una temperatura estable, se introdujo en su seno un termómetro correctamente calibrado mediante el cual se hicieron una serie de mediciones de temperatura para corroborar que efectivamente la temperatura marcada en el controlador era exactamente a la que realmente se encontraba el líquido en el tanque de reacción. De no ser así hubiera sido necesaria la modificación de esa temperatura para que el dispositivo marcará la realmente verdadera.

El siguiente objetivo era el ajuste del caudal de entrada al reactor. Para ello se tomaron una serie de mediciones del volumen de agua que la bomba era capaz de bombear en un minuto de tiempo. Tras obtener el dato del caudal de agua que la bomba proporcionaba durante un minuto, se dispuso a programar el temporizador de forma tal que durante todas las horas hubiera unos minutos de bombeo y que en total, al finalizar las veinticuatro horas de un día, se hubiera bombeado en torno a un litro de agua. Temporalmente se fue verificando que el caudal se encontraba en torno a ese valor durante toda la experiencia.

Finalmente, ya con todos estos parámetros anteriormente citados dentro de un correcto margen de funcionamiento, y con la planta funcionando durante unos días para la validación de las verificaciones que era necesario tener en cuenta, solamente faltaba la verdadera puesta en

marcha con la inoculación de unos 40 ml de fango digerido procedente de una instalación de aguas residuales urbanas. Una vez, el reactor contenía ese fango activado en el interior se hizo necesaria que la alimentación de la corriente de entrada fuese un agua sintética de una concentración inicial de aproximadamente 8000 mg/L de DQO.

Tras observar el comportamiento con esta concentración en el agua de entrada, se creyó conveniente rebajar esa carga orgánica a fin de ver la evolución del reactor y su consecuente producción de metano en otro rango de DQO pero siempre dentro de unos límites que vienen marcados por la concentración real que contiene un vertido de las características que se tratan en este proyecto.

Por último se volvió a introducir una concentración de DQO mayor a la inmediatamente anterior, pero semejante a la de inicio, en la corriente de entrada con vistas a extraer conclusiones y observar el mismo comportamiento del reactor, el modo de alcanzar el estado de estabilidad y examinar si era capaz de volver a asimilar una mayor carga orgánica con una generación de biogás determinada. Por lo tanto de esa forma queda resumida la secuencia de concentraciones que se dio entrada al reactor a lo largo de toda la experiencia realizada en el laboratorio y dedicada exclusivamente al estudio de este proyecto.

Una vez arrancada y puesta en marcha la planta piloto, se hace necesaria la medición de varios parámetros con el fin de llevar un control sobre la misma, conocer lo que está ocurriendo en el momento y poder actuar de manera preventiva o correctiva para mejorar su funcionamiento.

Estas medidas son tomadas diariamente en el laboratorio, unas por medio de observación como por ejemplo la temperatura, u otras por medio de unos ensayos concretos como puede ser la medida del valor de DQO y alcalinidad.

A continuación se detallarán los pasos llevados a cabo en el laboratorio durante un día para el análisis de todos los parámetros de los cuales se ha llevado un control a lo largo del estudio de la planta piloto.

Primeramente, al llegar al laboratorio se debe comenzar conectando la campana extractora donde está situada la planta piloto, con el fin de reducir los malos olores ya que una planta de depuración anaerobia puede producir olores indeseables debido a las reacciones que tienen lugar en el reactor y por la posible formación de ácido sulfhídrico gaseoso.

Seguidamente, se toma nota de los volúmenes que contienen los depósitos tanto de entrada, como de salida del reactor. Estos valores nos sirven para calcular y comprobar el caudal que entra en el reactor y que proporciona la bomba que hace la función necesaria para que circule la corriente de entrada.

Una vez tomados estos datos, se procede a la medida de otro volumen, pero esta vez será el referido a los gases producidos en el reactor. Esto se realiza en el gasómetro que está conectado al mismo reactor y es donde se acumula todo el gas. Se trata de un cilindro provisto de una escala colocada a lo largo de su altura. En el interior está repleto de agua que se desplaza a medida que se va formando gas, por lo que el parámetro que mediremos esta vez

será la altura del líquido desplazado. Una vez obtenido este dato medido en el gasómetro y conociendo las dimensiones del mismo, es decir, el diámetro del cilindro de lo que viene siendo el gasómetro, se pueda calcular el volumen de gas generado. Además también se procederá a analizar el porcentaje de cada componente que forma ese biogás, es decir, el porcentaje de metano y de anhídrido carbónico que se ha generado.

Con motivo de que al día siguiente se pueda tomar esta misma medida, será necesario volver a llenar por completo de agua cada uno de estos cilindros. Este paso se lleva a cabo gracias a unas válvulas que nos ayudan a que el agua que introduzcamos desplace esta vez el gas y no el agua ya contenida en el cilindro, como ocurre en la situación opuesta. De este modo, el gasómetro queda lleno de líquido con vistas a que al día siguiente se pueda volver a medir el volumen de líquido desplazado por el gas producido.

Tanto para la medición de volumen de los depósitos como para la de los gasómetros, se tendrá en cuenta y anotará el día y la hora exacta de la medida, puesto que los caudales que se están midiendo, están en función del tiempo.

La temperatura de cada uno de los reactores es otro parámetro a controlar diariamente. Puesto que el sistema empleado para mantener una temperatura constante se ha programado al poner en marcha la planta piloto con la ayuda de una serie de verificaciones, únicamente será necesario comprobar que el automatismo marca la temperatura programada (35°C) dentro del rango termófilo. Las verificaciones fueron llevadas a cabo comparando la temperatura marcada en el automatismo con la marcada en un termómetro situado muy próximo a la sonda del sistema como se cita en el apartado de puesta en marcha de la planta piloto. Por lo tanto lo importante de este paso es corroborar que la temperatura permanece constante en los reactores y es de 35°C a lo largo de toda la experiencia.

El siguiente paso es la toma de muestras para realizar los ensayos restantes. Se efectuará una toma de muestra de agua en la corriente de entrada y otra en la salida para observar y calcular el rendimiento de depuración que lleva a cabo el reactor a lo largo del transcurso de los días.

Una vez se tienen las muestras que van a ser analizadas, se destinará una cantidad determinada para el ensayo de determinación de DQO, y otra cantidad para determinar los ácidos grasos volátiles y la alcalinidad junto con el valor de pH (tal como se detalla en el apartado de “procedimiento analítico y determinaciones”).

Es necesario el mantenimiento y la limpieza continúa de los equipos, instrumentos y material empleados cada día durante la duración de la experiencia, así como asegurarse de apagar la campana extractora del laboratorio y comprobar que los temporizadores ponen en marcha los sistemas de bombeo de manera adecuada.

9.5 Análisis de Resultados

La operación se resume en la disposición de un licor de alta carga retenido en un pulmón y en el que inicialmente la demanda es de 8000 mg/L:

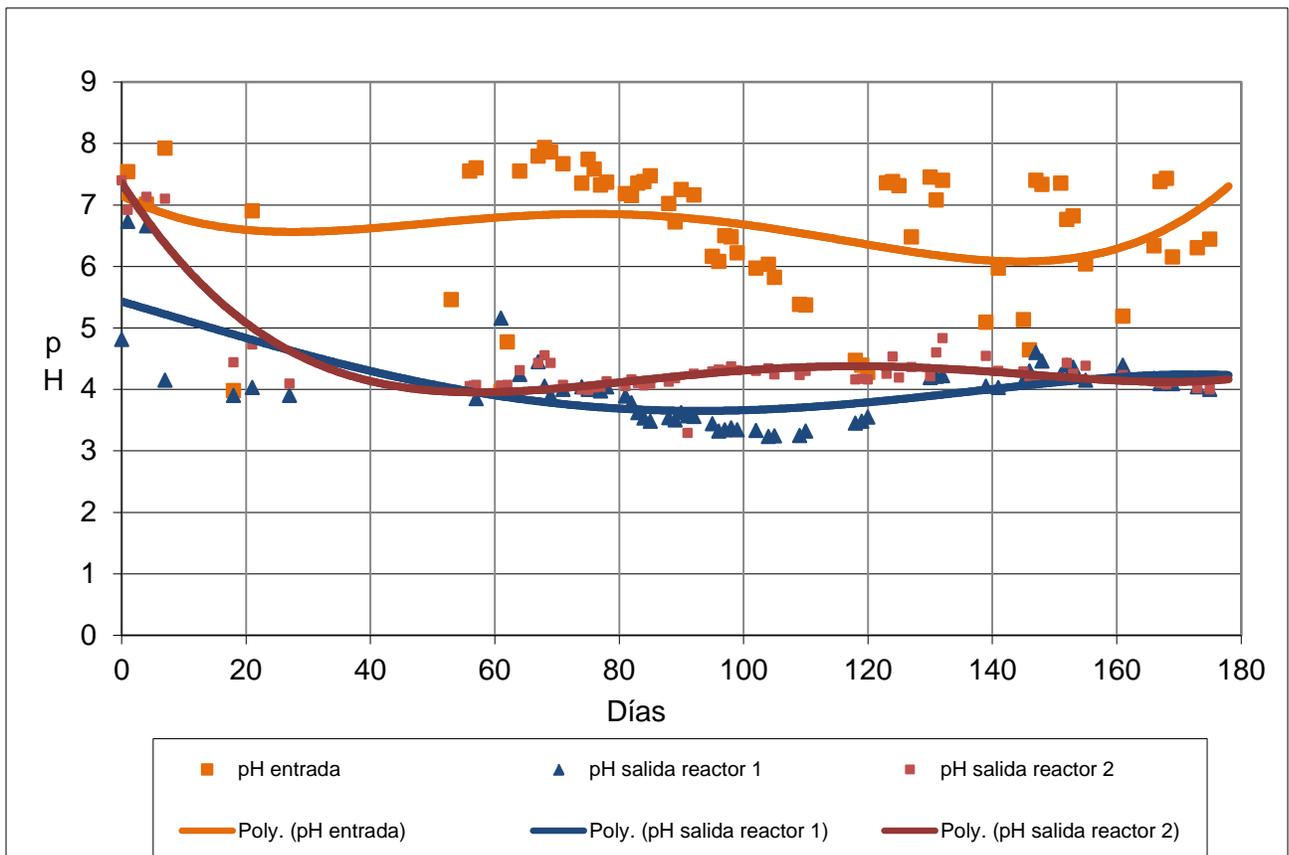
De este pulmón se alimenta al modelo, por el reactor 1 en la que permanece en fermentación anaerobia controlada y en régimen pulsante por aproximadamente 48 horas.

La salida está conectada a un depósito intermedio del que se alimenta en solución de continuidad a un reactor 2 que trabaja en condiciones semejantes.

De ambos reactores se extraen los gases generados, en depósitos independientes y en los que son recogidos por el procedimiento de válvula hidráulica y almacenados para su posterior control analítico (fracción de CO₂ y fracción de metano).

El pH es un parámetro fundamental a controlar en un reactor anaerobio, por lo que su representación adquiere un valor trascendente a la hora de comprender el comportamiento del reactor.

Gráfico 1: Evolución del pH



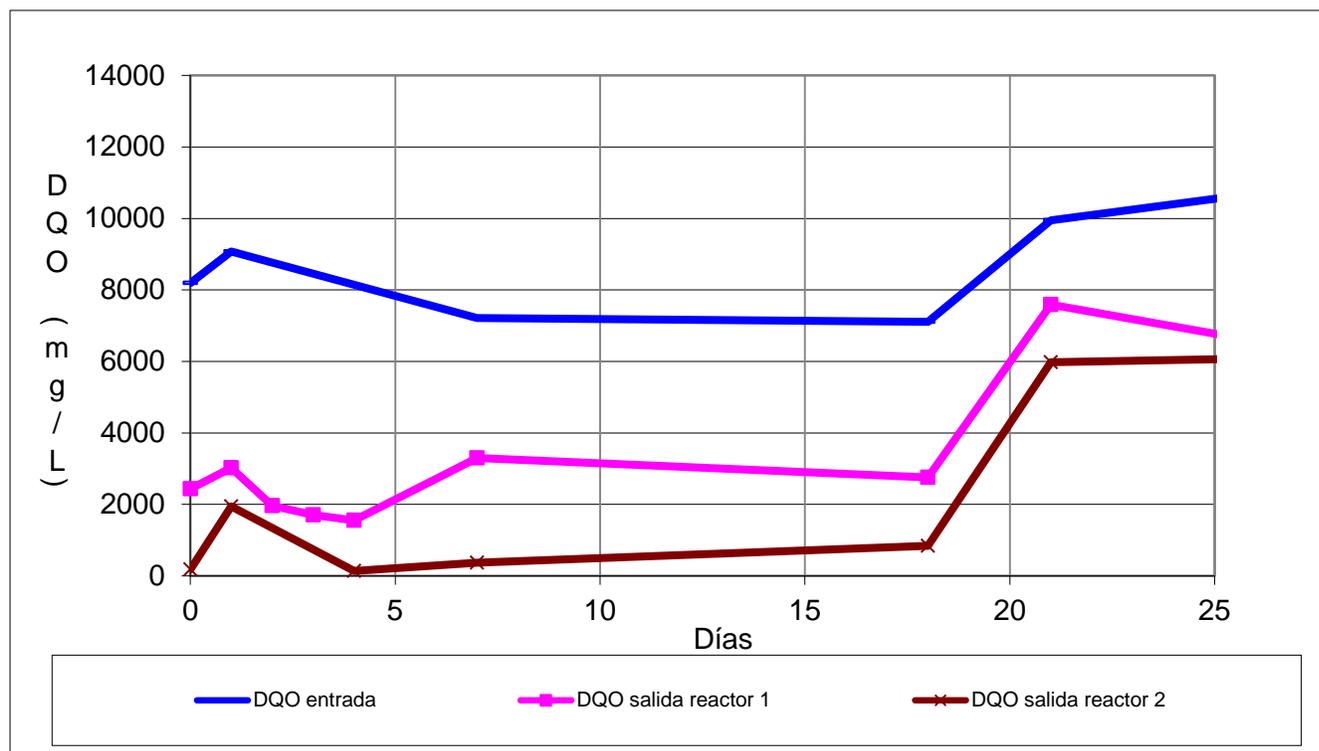
La gráfica muestra una tendencia sostenida durante la mayoría de la experiencia en los 3 puntos de muestreo, tanto en la alimentación al reactor, como en la salida del reactor 1 y en la salida del reactor 2. Merece mención la bajada pronunciada del pH en los primeros 20 días de las muestras de las salidas del reactor 1 y 2 (sobre todo la del segundo reactor), que nos sugiere un periodo de aclimatación del reactor y del pH del agua que lo atraviesa.

El reactor va adquiriendo un carácter cada vez más ácido debido a que los microorganismos acidogénicos se encargan de degradar las cadenas largas de materia orgánica y convertirlas en cadenas más cortas dando lugar a los ácidos que son los que aportan ese carácter al reactor. Mientras tanto, las bacterias metanogénicas van degradando esos ácidos, intentando mantener un equilibrio dentro del mismo reactor.

Al estar montado el sistema para poder ser controlado durante 190 días, ha sido posible obtener la respuesta en conversión de sacarosa y generación de ácidos grasos volátiles. Esto ha permitido elaborar el análisis estadístico de la respuesta, con lo que:

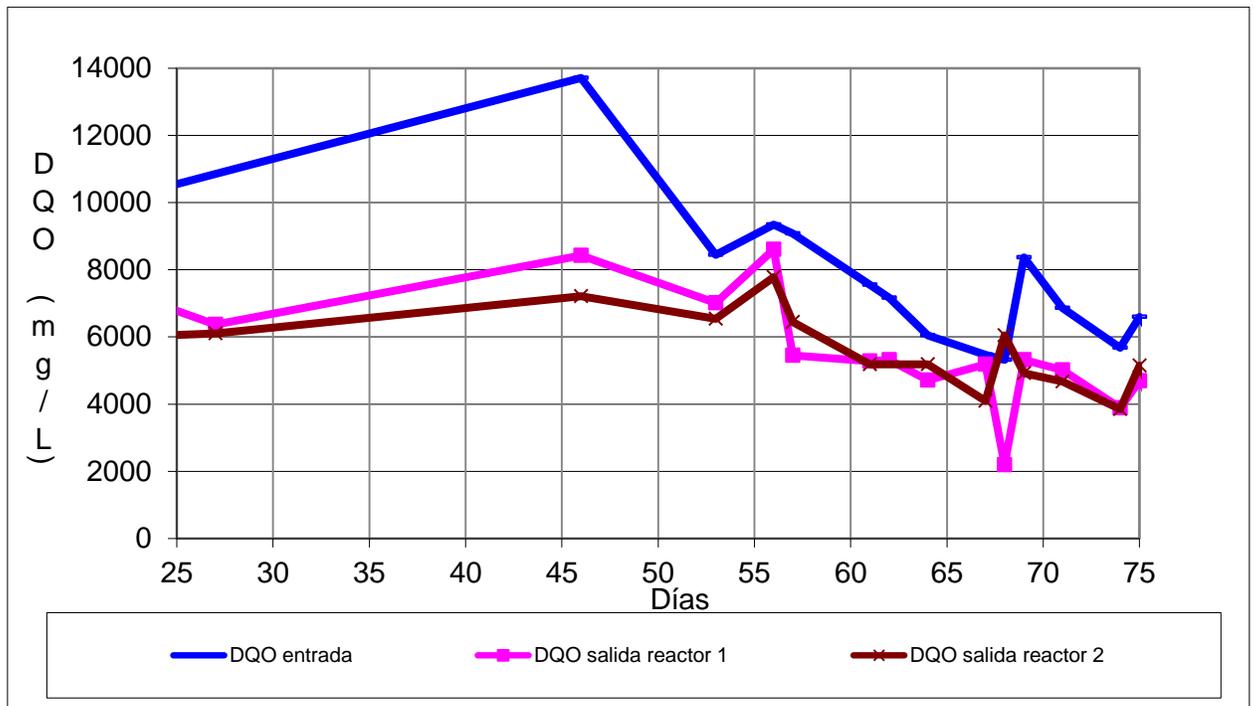
1. La primera etapa de operación de unos 25 días se puede considerar dedicada a la inicialización del proceso en donde se produce un incremento de la DQO, lo que se interpreta como una rotura de enlaces de azúcares que genera una mayor actividad en demanda de oxígeno: aquí no es significativo analizar los contenidos en DQO y las modificaciones de pH.

Gráfico 2: Evolución de la DQO a lo largo de los primeros 25 días



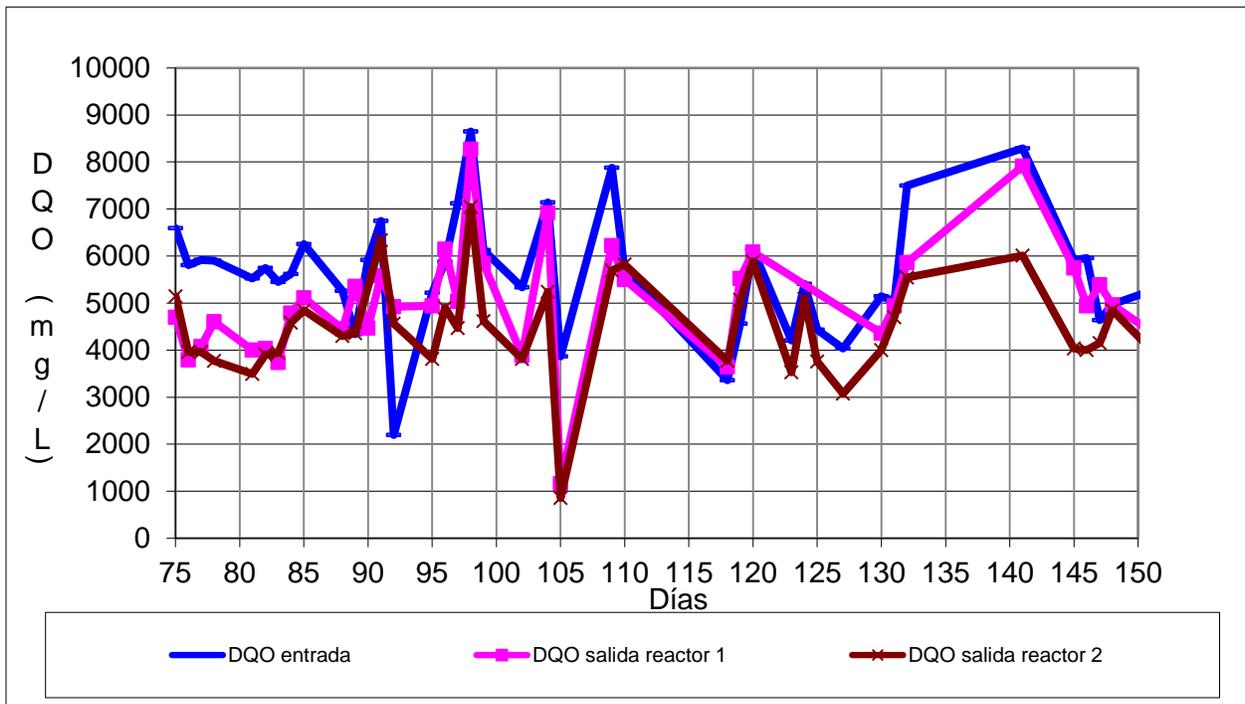
2. Superada esta primera etapa puede considerarse alcanzado el comienzo de la etapa de conversión y generación de ácidos grasos volátiles, claramente manifestado en el gráfico desde el día 25 al día 75, con una generación uniforme de AGV tanto en el reactor 1 como en el reactor 2, obteniéndose concentraciones en niveles 2200-2500 mg/L de AGV.

Gráfico 3: Evolución de la DQO del día 25 al 75



3. A partir de aquí ya el funcionamiento ha podido ser controlado averiguando como funciona cuando se interviene artificialmente sobre el alimento para garantizar que el inicio del proceso a partir de aquí se hará con pHs por encima de 3,8; lo que ha permitido observar que independientemente del pH del reactor los pHs se estabilizan siempre en niveles ácidos, lo que se manifiesta por una meta-conversión iniciada en el reactor 1 y continuada en el reactor 2 en AGV.

Gráfico 4: Evolución de la DQO del día 75 al 150



4. Se consideran significativos los días 144 al final para los que manteniéndose una independencia del pH de entrada y con unas lecturas de carga orgánica de salida próximas a 3000 mg/L se observa una generación cuasi-constante de AGV.

Gráfico 5: Evolución de la DQO del día 140 al 185

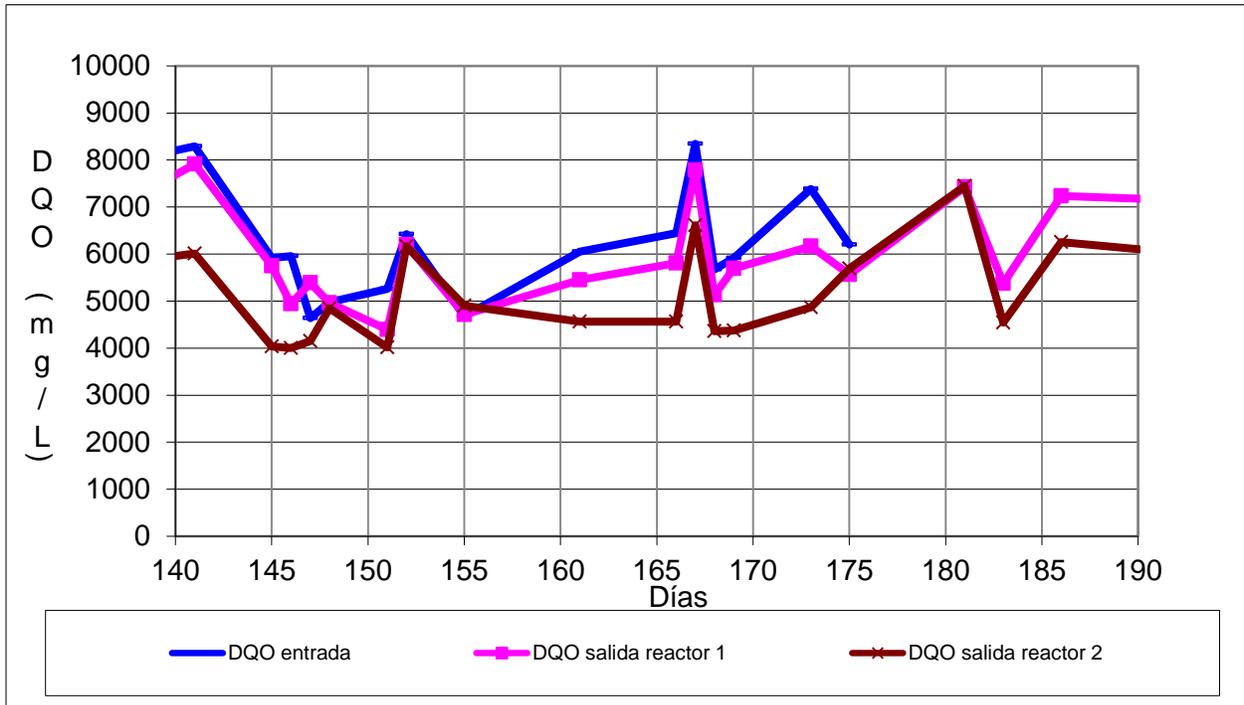
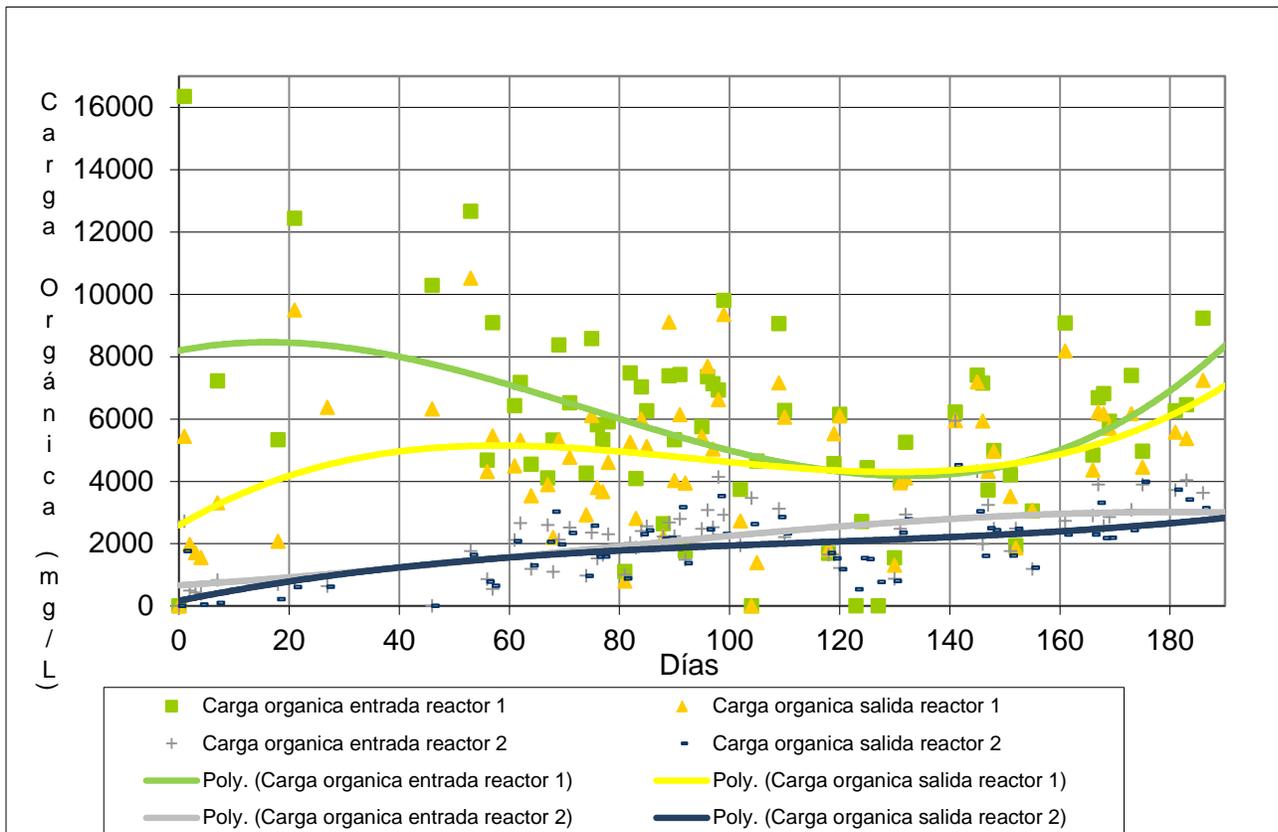


Gráfico 6: Evolución de la Carga Orgánica



La carga orgánica que pasa al reactor anaerobio es la concentración de DQO que entra en el mismo multiplicado por el caudal, es decir, la cantidad de materia orgánica a degradar que entra en un reactor en un mismo día.

Se puede observar en el 5 gráfico, que los primeros días la carga es elevada, le sigue otra fase en la que la carga se reduce a la mitad para luego volver a ascender a los 18 días. Estos cambios son debidos principalmente a la DQO de entrada, ya que el caudal se mantiene constante a lo largo de la experiencia.

Podemos observar a lo largo de las gráficas como la situación de las líneas es coherente con la reducción de DQO a medida que el agua va atravesando la planta piloto. Podemos observar como a partir del día 55, la carga orgánica se muestra más variable.

Gráfico 7: Tendencia Reducción de DQO para cada Reactor

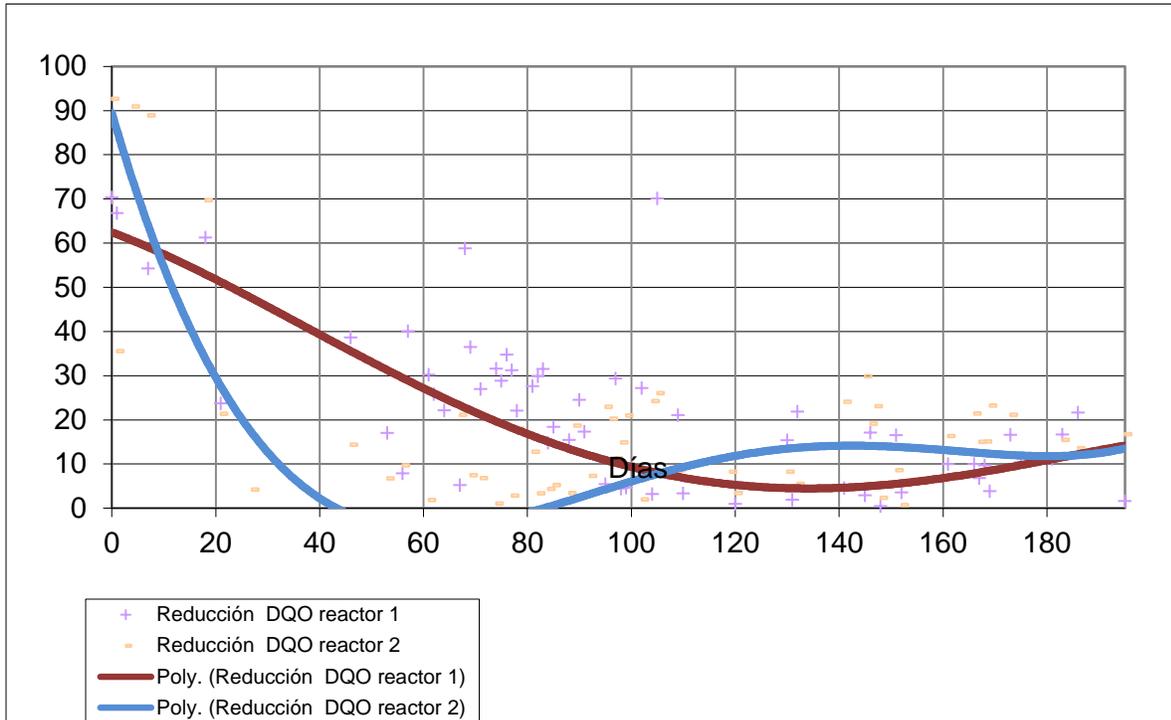
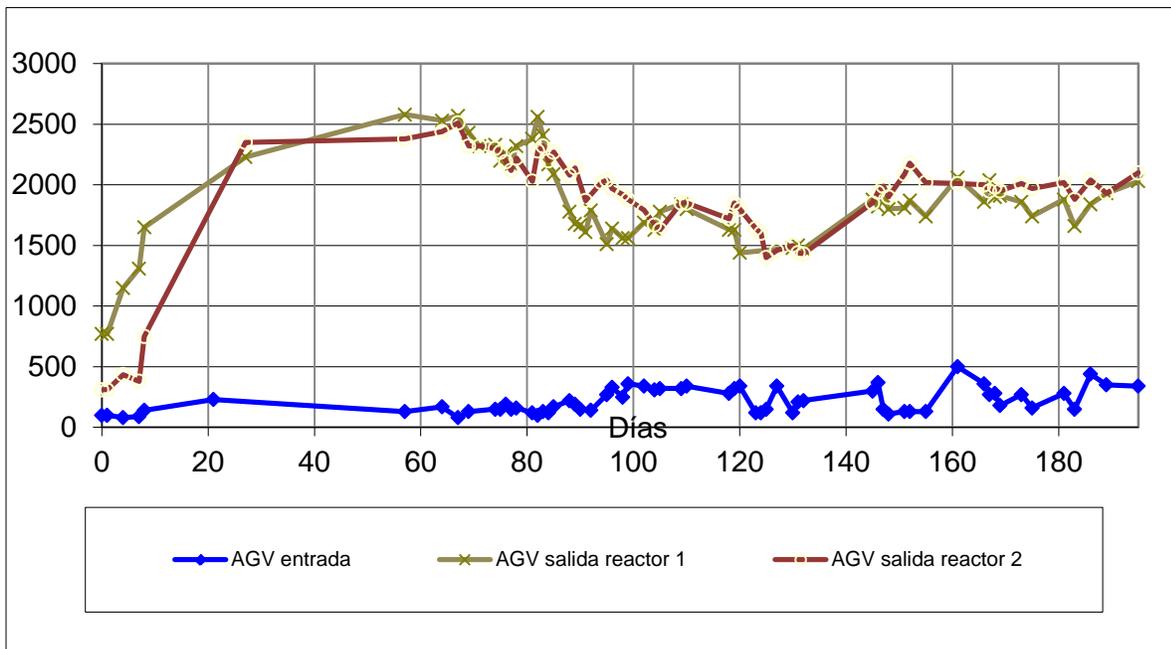


Gráfico 8: Ácidos Grasos Volátiles/día



Este gráfico muestra la acción de la actividad acidogénica-metanogénica del reactor, como la cantidad de ácidos grasos volátiles se mantiene constante en el agua de entrada debido a que la fabricamos en el laboratorio, siguiendo parámetros que se mantienen constantes. Al mismo tiempo, podemos observar una evolución en las aguas de salida de ambos reactores. Especialmente significativo es el incremento en los primeros 40 días para después caer del día 60 al 100.

Conclusiones

Para una concentración de entrada de 8000mg/L de demanda, el sistema permite obtener un enriquecimiento en ácidos grasos volátiles próximos a los 2000 mg/L con pHs significativamente constantes e independientemente del pH de entrada en los reactores.

Se demuestra la trascendencia de la primera etapa de la digestión anaerobia para este caso en la que para una permanencia final de cuatro días se logra una reducción del orden del 60% y una generación de AGV de 2000 mg/L.

La proporción en el gas generado de metano y CO₂ (45-55%) se corresponde con las referencias bibliográficas de oxidación biológica o química de los azúcares referenciados en el licor madre.

Bibliografía

- F. Fdez. Polanco, P.A. García, S. Hernando. Depuración anaerobia de aguas residuales. Actas del 4o seminario D.A.A.R. Universidad de Valladolid. 1988.
- Metcalf-Eddy. Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales. Madrid: Ed. Labor, 1985.
- Ramalho. R. S. Tratamiento de aguas residuales. Ed. Reverte.
- José García Garrido. Agua para la industria. SPUPV.
- José García Garrido. Aguas industriales acondicionamiento. SPI TV
- José García Garrido. Aguas residuales. SPUPV.
- José García Garrido. La calidad del agua. Prensa XXL S.A.
- José García Garrido, Antonio.D. Rodríguez López. Industrias químicas y agroalimentarias. SPUPV.
- Nelson L. Nemcrow, Avíjit Dasupta. Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos. Ed: Díaz de santos, 1998.
- Nelson L. Nemerow. Industrial Waste Treatment. Elsevier, 2007.
- Miguel Rigola Lapeña Boixareu. Tratamiento de aguas industriales: aguas de Proceso y residuales.

Presupuesto

Como bien puede comprenderse en la materialización de este tipo de presupuestos es necesaria la utilización de toda una serie de material de laboratorio para así poder llevar a cabo la parte experimental. Además, se va a valorar el tiempo dedicado en las diversas tareas que han sido necesarias para la elaboración del proyecto (búsqueda de información, análisis de resultados, redacción del proyecto, etc.). Es por ello que en el siguiente presupuesto se hace referencia tanto al coste del material usado como al coste de las horas empleadas en su realización.

Para una mejor comprensión y organización de este presupuesto, se dividirá en cinco bloques que darán una idea desglosada de la cantidad total a la que asciende. Estos cinco bloques son los siguientes: Material de vidrio, instrumentos, equipos, reactivos y elaboración del proyecto.

A continuación se detalla cada bloque en una tabla por separado y al final se muestra una tabla resumen donde se incluyen estos bloques.

Todos los precios que aparecen en las tablas que a continuación se muestra» tienen incluido el 21% de IVA.

Material de Vidrio:

Este apartado hace referencia a todo el material de vidrio empleado en el laboratorio y que resulta necesario para llevar a cabo los análisis diarios en la planta piloto.

Referencia	Descripción	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
V1	Matraz Aforado 50 mL	4	15,09	60,36
V2	Matraz Aforado 100 mL	4	14,15	56,6
V3	Matraz Aforado 200 mL	4	18,37	73,48
V4	Matraz Aforado 500 mL	2	20,87	41,74
V5	Matraz Aforado 1000 mL	2	21,79	43,58
V6	Matraz Erlenmeyer 100 mL	4	14,40	57,6
V7	Matraz Erlenmeyer 150 mL	4	17,27	69,08
V8	Matraz Erlenmeyer 250 mL	4	19,05	76,2
V9	Matraz Erlenmeyer 500 mL	2	16,07	32,14
V10	Probeta de 50 mL	3	13,83	41,49
V11	Probeta de 100 mL	2	15,83	31,66
V12	Probeta de 250 mL	3	24,84	74,52
V13	Bureta de 50 mL	4	37,22	148,88
V14	Pipeta de 5 mL	6	6,35	38,1
V15	Pipeta de 10 mL	6	6,78	40,68
V16	Pipeta de 50 mL	3	13,82	41,46
V17	Vaso Precipitados 100 mL	8	5,74	45,92
V18	Vaso Precipitados 250 mL	6	6,09	36,54
V19	Vaso Precipitados 600 mL	4	7,42	29,68
V20	Vaso Precipitados 1000 mL	3	9,42	28,26
V21	Varilla	3	8,03	24,09
V22	Tubos de Ensayo	50	30,42	1521
V23	Cubeta	3	1,23	3,69
V24	Viales de DQO	300	1,88	564
			Total	3180,75

Instrumentos:

A continuación se detalla la lista de instrumentos y otros materiales que también han sido importantes a la hora de la realización de los ensayos en el laboratorio.

Referencia	Descripción	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
I1	Termómetro de Varilla	2	5,42	10,84
I2	Imanes para Agitación	3	1,34	4,02
I3	Temporizador	1	8,65	8,65
I4	Pipeteador	3	34,00	102
I5	Soporte de Buretas	2	11,55	23,1
I6	Tapones de Matraces Aforados	25	0,8	20
I7	Cuentagotas	2	0,5	1
I8	Espátula	3	1,38	4,14
I9	Tubo de Goma	7	1,42	9,94
I10	Juntas para Tubería	3	1,12	3,36
I11	Codos para Tuberías	2	1,23	2,46
I12	Bomba Regulable	2	10,90	21,8
I13	Bandejas PVC	3	1,43	4,29
I14	Botellas Plástico 1,5L	4	0,60	2,4
I15	Garrafa de Plástico 7,5L	1	2,46	2,46
I16	Garrafa Plástico 4L	2	1,75	3,5
I17	Silicona	1	4,67	4,67
I18	Difusores	2	2,60	5,2
I19	Gradilla Tubos de Ensayo	2	17,92	35,84
I20	Caja Guantes Látex	2	8,25	16,5
			Total	286,17

Equipos:

Esta tabla viene dada por los equipos empleados en el laboratorio.

Referencia	Descripción	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
E1	pH-metro GLP 22 Crison	1	893	893
E2	Espectrofotómetro Milton Roy Genesis 5	1	2050	2050
E3	Placa Calentadora Agitadora Delabo	1	350	350
E4	Termorreactor Eco 16 Velp Científica	1	750	750
E5	Balanza Digital Kern 440-35N	1	300	300
E6	Reactor Anaerobio	1	15000	15000
			Total	19343

Reactivos:

Aquí figuran cada uno de los reactivos utilizados tanto para los ensayos realizados en el laboratorio como para la preparación de disoluciones.

Referencia	Descripción	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
R1	Depósito de Agua Destilada 5L	3	2,95	8,85
R2	Ácido Sulfúrico Concentrado 1L	1	105,74	105,74
R3	Hidróxido Sódico 1N 500g	1	13,77	13,77
R4	Sacarosa 1Kg	4	5,76	23,04
R5	Hidrógeno Carbonato Amonio 500g	1	17,20	17,20
R6	Dihidrógeno Fosfato Potasio 500g	1	26,35	26,35
R7	Hidrógeno Carbonato Sodio 500g	1	15,38	15,38
R8	Hidrógeno Carbonato Potasio 500g	1	28,14	28,14
R9	Trazas de Metal A 1,5L	1	19,35	19,35
R10	Trazas de Metal B 1,5L	1	20,40	20,40
R11	Dicromato Potásico 150g	1	30,18	30,18
R12	Sulfato de Plata 25g	1	99,20	99,20
R13	Sulfato de Mercurio 100g	1	31,96	31,96
R14	Ácido Clorhídrico Concentrado 1L	1	80,75	80,75
R15	Hidróxido de Potasio 500g	1	27,97	27,97
			Total	548,28

Elaboración del Proyecto:

En este bloque se calcula el precio que se corresponde a la elaboración de este proyecto por parte del ingeniero a lo largo de un periodo determinado de tiempo.

Referencia	Descripción	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
J1	Búsqueda de Información	1	1600	1600
J2	Elaboración de Ensayos	1	1600	1600
J3	Análisis Resultados	1	1600	1600
J4	Redacción del Proyecto	2	1600	3200
			Total	8000

Tabla resumen:

Una vez obtenidas las tablas de cada uno de los bloques donde se refleja el presupuesto al que ha ascendido cada uno de ellos, en esta tabla se recogen los totales y se obtiene el valor del presupuesto del proyecto.

Referencia	Descripción	Total (€)
V	Material de Vidrio	3180,75
I	Instrumentos	286,17
E	Equipos	19343
R	Reactivos	548,28
J	Elaboración Proyecto	8000
TOTAL		31543,51

Asciende el presupuesto de este proyecto a TREINTA Y UN MIL QUINIENTOS CUARENTA Y TRES CON CINCUENTA Y UNO CÉNTIMOS DE EURO.