



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
MEDIANTE PROCESOS BIOLÓGICOS
ANAERÓBIOS.

TRABAJO DE SEMINARIO DE TITULACION

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O Q U I M I C O

P R E S E N T A :

ALEJANDRO LOPEZ IBARRA

ASESOR: I. Q. MARIANO RAMOS OLMOS

MEXICO, D. F.

NOVIEMBRE DE 2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA

JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA

OFICIO: FESZ/JCIQ/095/03

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNO: LÓPEZ IBARRA ALEJANDRO

P r e s e n t e.

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

| | |
|-------------|-----------------------------------|
| Presidente: | I.Q. Eduardo Loyo Arnaud |
| Vocal: | I.Q. José Mariano Ramos Olmos |
| Secretario: | I.Q. Eduardo Vázquez Zamora |
| Suplente: | Dr. Roberto Mendoza Serna |
| Suplente: | I.Q. Juan Antonio Dávila Gordillo |

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”

México, D. F., 27 de Octubre de 2003

EL JEFE DE LA CARRERA

Mi. en C. ANDRÉS AQUINO CANCHOLA

INGENIERIA QUIMICA
SECRETARIA TECNICA

Agradecimientos a:

Mi madre, Ma. Elena Ibarra Mondragón, que a pesar de grandes dificultades siempre me ha demostrado su amor, apoyo.

Mi hermana Laura, porque a pesar de que no está aquí, siempre la llevo en mi, recordando la felicidad que por poco tiempo trajo a este mundo.

Mi esposa Adriana Zanella, el amor de mi vida, por todo lo bueno que ha traído a mi vida y por acompañarme en los momentos difíciles y felices.

Mi hijo Alejandro, por ser simplemente lo que es, un ser maravilloso.

Mi hijo Diego, por ser una luz en mi vida y por toda la alegría que siempre me regala.

Mi hermana Norma, porque se que esta meta la alegrará.

A la UNAM por ser la gran Universidad de México y a la que le debo mi formación, gracias.

A Mariano Ramos Olmos, por ser un maestro más allá de las aulas y enseñarme que lo más importante se aprende afuera.

A mis amigos por todo su apoyo.

Índice

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| I. PROCESOS BIOLÓGICOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES | 8 |
| II. ANTECEDENTES DE LOS PROCESOS ANAEROBIOS.... | 13 |
| III. BIOQUÍMICA DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA | 20 |
| IV. TIPOS DE REACTORES ANAEROBIOS | 41 |
| V. CASOS DE APLICACIÓN | 69 |
| VI. CONCLUSIONES | 78 |
| BIBLIOGRAFÍA | 80 |

Índice de tablas

| Tabla | Contenido | Página |
|-------|--|--------|
| 1 | Usos del agua en México, Extracciones brutas de agua (1998). | 2 |
| 2 | Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en México. | 3 |
| 3 | Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales por proceso en México. | 5 |
| 4 | Plantas de tratamiento de aguas residuales industriales en México 2001. | 5 |
| 5 | Consumo de agua para la producción de algunos artículos. | 6 |
| 6 | Giros industriales con mayores cargas contaminantes. | 6 |
| 7 | Comparación entre los tratamientos anaerobio y aerobio. | 6 |
| 8 | Residuos que pueden tratarse por digestión anaerobia. | 14 |
| 9 | Reactores a escala comercial construidos en el mundo hasta enero del 2003 para tratar diferentes tipos de aguas residuales y de drenaje. | 15 |
| 10 | Muestra de reactores anaerobios construidos entre 1989-2003. | 16 |
| 11 | Compuestos orgánicos que pueden ser tratados con digestión anaerobia. | 17 |
| 12 | Algunas especies bacterianas de la digestión anaerobia. | 24 |
| 13 | Reacciones acetogénicas más comunes. | 29 |
| 14 | Concentraciones de micronutrientes requeridos por los microorganismos anaerobios. | 39 |
| 15 | Tipos de reactores aplicados en México. | 51 |
| 16 | Características de un reactor de lecho fijo. | 54 |
| 17 | Reactores de película fija en Alemania hasta 1997. | 56 |
| 18 | Datos de diseño y operación de digestores anaerobios. | 61 |
| 19 | Composición del agua residual en la producción de ácido tereftálico | 73 |
| 20 | Reacciones de oxidación para cada componente. | 74 |
| 21 | Resultados estandarizados de DQO remanente en reactores. | 76 |

Indice de figuras

| Figura | Contenido | Página |
|---------------|--|---------------|
| 1 | Procesos de tratamiento de agua residual, (1998). | 4 |
| 2 | Etapas en la producción de metano a partir de residuos orgánicos. | 23 |
| 3 | Organismos asociados al tratamiento biológico del agua residual. | 25 |
| 4 | Procesos de tratamiento anaerobios comúnmente utilizados. | 42 |
| 5 | Principales componentes de un reactor: recipiente cerrado, sistemas de mezclado, de calentamiento y de separación gas-líquido. | 43 |
| 6 | Soportes típicos en filtros anaerobios. A flujo cruzado; B tubular; C de anillo. | 44 |
| 7 | Filtro anaerobio. | 52 |
| 8 | Diseños de reactores de primera generación. | 57 |
| 9 | Reactores de primera generación. | 58 |
| 10 | Diseños de reactores de segunda generación. | 59 |
| 11 | Posibles rutas para tratamiento de biosólidos. | 68 |
| 12 | Diagrama de flujo de la planta modificada tratadora de aguas residuales del IIE. | 71 |
| 13 | Esquema del sistema para obtener lodo anaerobio. | 75 |
| 14 | Esquema de operación. | 76 |
| 15 | Esquema de operación con dos reactores del tipo UASB | 77 |

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El agua se está convirtiendo en un bien escaso, ya que no cesa de aumentar su consumo como resultado del crecimiento de la población y, del mejor nivel de vida. En el 3^{er} mundo, el consumo medio de agua por habitante es del orden de 50 l/día, mientras que en las naciones industrializadas sobrepasa los 500 l/día (estos datos comprenden todos los usos). Además en los últimos años se ha tomado conciencia de los efectos acumulativos de la contaminación y de la necesidad de cuidar el ambiente, ya que en la actualidad es innegable el daño que se ha causado a la naturaleza, haciendo de vital importancia la conservación de los pocos recursos naturales que nos quedan.

Tabla 1. Usos del agua en México, Extracciones brutas de agua (1998).

| Uso | Origen | | Volumen total (Km ³) | % De la extracción |
|--|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------------|
| | Superficial Km ³ | Subterráneo Km ³ | | |
| Agrícola | 44.4 | 16.1 | 60.5 | 76.3 |
| Público (incluye industria y servicios) | 4.1 | 9.4 | 13.5 | 17.0 |
| Industrial (industria autoabastecida) | 1.6 | 2.5 | 4.1 | 5.1 |
| Acuícola | 1.1 | 0 | 1.1 | 1.4 |
| En termoeléctricas | 0 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| Total | 51.2 | 28.2 | 79.4 | 100.0 |

Fuente: CNA/SGC/unidad de agua potable y saneamiento/gerencia de potabilización y tratamiento. (Además se evaporaron 9 km³ de agua al año en las principales presas y lagos del país).

La descarga directa de aguas contaminadas en cuerpos de agua puede reducir la disponibilidad de oxígeno disuelto, destruir la vida acuática existente, y hacer que esa fuente de agua se convierta en un sitio inapropiado para abastecer a comunidades o el sitio sea inútil para otros beneficios que demanda el ser humano.

México, ha manifestado su preocupación con diferentes acciones dentro de las que se encuentra una legislación cada vez más estricta en cuanto a las características que deben cumplir las descargas de residuos industriales antes de ser depositados en el ambiente, y que obliga a municipios y empresas a obedecer ciertos estándares en sus aguas residuales.

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En términos generales los sistemas de tratamiento de aguas residuales se distinguen en: sistemas de procesos físicos, químicos, fisicoquímicos y los de tipo biológico. Los biológicos son a su vez procesos aerobios o anaerobios, dependiendo de si requieren para su operación del suministro de aire o no.

Tradicionalmente en nuestro país el tratamiento biológico de aguas residuales se ha efectuado empleando procesos aerobios, tales como lodos activados, lagunas aireadas y filtros percoladores. Sistemas que se caracterizan por la acción de bacterias y otros organismos que requieren de aire para su existencia, razón por la cual uno de los factores más importantes en estos sistemas es la energía requerida para suministrar las cantidades necesarias de aire.

Según la Comisión Nacional del Agua, en México (1998), los centros urbanos generaban 239m³/s (1.86 millones de ton de DBO al año) y se tenían construidas 914 plantas de tratamiento municipales con una capacidad instalada de 63.2m³/s, de los cuales 727 estaban en operación tratando 40.9m³/s (0.22 millones de ton de DBO al año), 21.8% del total de aguas residuales urbanas fueron tratadas (ver tabla 2).

Tabla 2. Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en México 2001.

| Año | Total | | En operación | | | | Fuera de operación |
|------|----------------|------------|----------------|---------------|-------------|----------------|--------------------|
| | No. de plantas | Caudal lps | No. de plantas | Instalado lps | Tratado lps | No. de plantas | Instalado lps |
| 1992 | 546 | N.D. | 394 | N.D. | 30554.0 | 152 | N.D. |
| 1993 | 650 | N.D. | 454 | N.D. | 30726.0 | 196 | N.D. |
| 1994 | 666 | 42788 | 461 | N.D. | 32065.0 | 205 | N.D. |
| 1995 | 680 | 54638 | 469 | 48172.0 | 32905.2 | 211 | 6466 |
| 1996 | 793 | 54765 | 595 | 51696.3 | 33745.4 | 198 | 3092 |
| 1997 | 821 | 61653 | 639 | 57401.7 | 39388.8 | 182 | 4251 |
| 1998 | 914 | 63151 | 727 | 58560.2 | 40854.7 | 187 | 4591 |
| 1999 | 1000 | 67543 | 777 | 61569.0 | 42396.8 | 223 | 5988 |
| 2000 | 1018 | 75953 | 793 | 68970.0 | 45927.3 | 225 | 6983 |
| 2001 | 1132 | 80622 | 938 | 73852.6 | 50810.0 | 194 | 6770 |

Fuente: CNA/SGC/gerencia de potabilización y tratamiento. N.D. = no disponible

La industria generaba en 1998, 170 m³/s (7.63 millones de ton de DBO al año) y se remueven 0.85 millones de ton de DBO al año y se tenían construidas 1354 plantas de tratamiento industriales una capacidad instalada de 21.9m³/s.

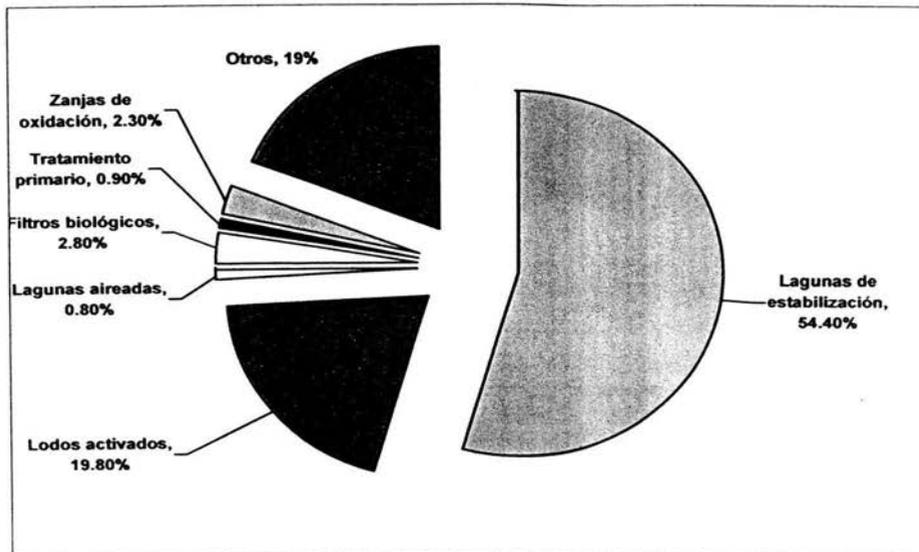


Figura 1. Procesos de tratamiento de agua residual en México, (1998). T. primario: remoción de material flotante y sólidos sedimentables.

Bajo estas condiciones, la energía requerida por las plantas de tratamiento para procesar aguas residuales, tiende a aumentar debido a la creciente cantidad de aguas residuales generadas. Si consideramos además que la mayor parte del tratamiento biológico de agua en México es aerobio el costo del tratamiento aumentará y será función del costo de la energía. Por lo cual es recomendable tratar de aplicar conjuntamente métodos anaerobios y aerobios a fin de hacer más rentable el tratamiento del agua residual.

Por otro lado, la producción de lodos residuales de tales plantas en el país se estima en 1 millón de ton/año, de las cuales muy bajo porcentaje se trata y maneja adecuadamente para su disposición final siendo en algunos casos exprimidos con filtros prensa y transportados hasta "rellenos sanitarios"; el costo de esta operación se estima en \$715/ton de lodos residuales; si la

totalidad de los lodos residuales producidos en nuestro país se dispusiera de esta manera, tendría un costo superior a los \$750 millones de pesos anuales.

A raíz de la crisis energética de los 70's, los sistemas anaerobios se han estudiado con mayor intensidad, lo que ha dado por resultado reactores de gran velocidad de reacción que contienen poblaciones densas de microorganismos de gran actividad. Estos desarrollos permiten tener capacidades de tratamiento similares a los sistemas aerobios a costos menores tanto de operación como de mantenimiento, ya que no requieren energía para aireación y generan de cinco a seis veces menos cantidad de lodos residuales.

Tabla 3. Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales por proceso en México 2001.

| Proceso | No. | Caudal lps |
|--------------------------|-------------|---------------|
| Biodiscos | 10 | 811 |
| Dual | 3 | 3600 |
| Filtros biológicos | 38 | 4293 |
| Laguna de estabilización | 530 | 14897 |
| Lagunas aireadas | 15 | 5504 |
| Lodos activados | 226 | 33143 |
| Primario | 13 | 3533 |
| Primario avanzado | 14 | 8945 |
| RAFA | 53 | 1426 |
| Reactor enzimático | 36 | 130 |
| Tanque Imhoff | 57 | 863 |
| Tanque séptico | 53 | 280 |
| Wetland | 21 | 178 |
| Zanjas de oxidación | 31 | 2684 |
| Otros | 32 | 336 |
| Total | 1132 | 80622 |

Fuente: CNA/SGC/Unidad de agua potable y saneamiento/gerencia de potabilización y tratamiento.

Tabla 4. Plantas de tratamiento de aguas residuales industriales en México.

| AÑO | No. de plantas | | | Caudal lps | |
|------|----------------|--------|-----------|--------------|-----------|
| | Total | Operan | No operan | Diseño | Operación |
| 2001 | 1485 | 1405 | 80 | 41900. 93 | 25352.67 |

Fuente: CNA/SGC/Unidad de agua potable y saneamiento/gerencia de potabilización y tratamiento.

Tabla 5. Consumo de agua para la producción de algunos artículos.

| Artículos | Consumo de agua (litros) |
|--------------------|--------------------------|
| 1 litro de cerveza | 25 |
| 1 kg de cemento | 40 |
| 1 kg de papel | 300 |
| 1 kg de aluminio | 1200 |

Tabla 6. Giros industriales con mayores cargas contaminantes.

| Industria | Caudal de aguas residuales (m ³ /s) | Materia orgánica generada (DBO) (miles ton/año) |
|------------------|--|---|
| Azucarera | 64.8 | 2232 |
| Química | 13.4 | 66 |
| Petrolera | 6.2 | 59 |
| Celulosa y papel | 4.5 | 93 |
| Hierro y acero | 4.5 | 17 |

La Tabla 7 compara los sistemas anaerobios con los aerobios. Se observa que las diferencias entre unos y otros sistemas sugieren la conveniencia de aplicarlos en forma conjunta, en lugar de antagonizarlos como se ha pretendido durante mucho tiempo.

Tabla 7. Comparación entre los tratamientos anaerobio y aerobio.

| Parámetro | Anaerobio | Aerobio |
|--|---|--|
| Requerimientos de energía | Bajos | Altos |
| Grado de tratamiento | Moderado (60-90%) | Alto (95%) |
| Producción de lodos | Baja | Alta |
| Estabilidad del proceso (a Compuestos tóxicos y sobrecargas) | Baja a moderada | Moderada a alta |
| Tiempo para arranque | 2 a 4 meses | 2 a 4 semanas |
| Requerimientos de nutrientes | Bajos | Altos para ciertos desechos industriales |
| Olor | Problemas potenciales | Menores posibilidades |
| Requerimientos de alcalinidad | Alto para ciertos desechos industriales | Bajos |
| Producción de biogás | Sí | No |
| Costos de inversión | USD \$ 30/cápita | USD \$ 50/cápita |
| Costos de operación | USD \$ 0.4/cápita | USD \$ 0.8-1/cápita |

Fuente: José Luis Arvizu Fernández, Instituto de Investigaciones Eléctricas.

La unión o combinación de estos sistemas en forma apropiada da por resultado la obtención de un tratamiento adecuado y más económico para un fin determinado, y, en especial, para el tratamiento de aguas residuales municipales o de albañales.

I. PROCESOS BIOLÓGICOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS

Son los procesos biológicos llevados a cabo en las aguas residuales por una o varias comunidades de microorganismos vivos, comúnmente bacterias, en presencia o ausencia de oxígeno disuelto que consumen la materia orgánica contenida en las aguas.

Clases de tratamientos biológicos

Los de uso común, se clasifican en:

- **Aerobios:** Son realizados por microorganismos, cuyo metabolismo tiene lugar en presencia de oxígeno disuelto. Los productos finales son principalmente CO_2 y H_2O , con desprendimiento de energía, en parte empleada en la formación de nuevos microorganismos.
- **Anaerobios:** Son realizados por microorganismos cuyo metabolismo se realiza en ausencia de oxígeno, pudiendo verse gravemente afectados por la presencia de este elemento. Los productos finales mayoritariamente son CH_4 y CO_2 .
- **Facultativos:** Los microorganismos responsables de estos procesos (organismos facultativos) son indiferentes a la presencia de oxígeno disuelto.

COMPARACION DE TRATAMIENTOS AEROBIOS Y ANAEROBIOS.

Hasta fechas recientes, los tratamientos aerobios han sido los procesos industriales de depuración realizados a gran escala, pero a partir de la década pasada se están imponiendo los procesos anaerobios, principalmente en depuradoras de aguas residuales cuya DBO_5 supera las 1500 p.p.m, porque este tratamiento ofrece sobre el aerobio más resultados positivos que negativos.

Inicialmente la degradación anaerobia fue utilizada para la gasificación de suspensiones espesas de partículas, con concentraciones altas de materia orgánica. Estos lodos pueden ser producto del tratamiento aerobio de las aguas residuales, los residuos agrícolas y las excretas de animales.

Las aguas residuales generadas por la industria fueron las primeras en ser sometidas al tratamiento anaerobio, ya que su característica de contener grandes cantidades de materia orgánica, hace difícil su tratamiento por medio de los sistemas aerobios que han sido desarrollados más ampliamente, por lo que el sistema anaerobio representaba un atractivo para la operación, por razones económicas.

Ventajas del tratamiento anaerobio

Producción de energía: Por la acción de las bacterias metanogénicas, gran parte del contenido orgánico de las aguas se transforma en metano; teóricamente 1 Kg. de la DQO eliminada produce 350 l. de metano. Este combustible posee un elevado poder energético utilizable. La depuración aerobia, por el contrario, precisa grandes cantidades de aire (O_2), que deben ser suministradas por aireadores o compresores, con el consiguiente consumo energético.

Producción de fangos: Por quedar convertida la mayor parte de la materia orgánica, en el proceso anaerobio, en biogás, el sólido restante queda bien estabilizado y utilizable previa deshidratación. Los fangos producidos en el tratamiento aerobio son de 5-10 veces superiores en cantidad a los anaerobios, y debido a la gran producción de materia orgánica celular degradable que contienen (por verificarse en éstos una mayor síntesis celular), además de deshidratarlos deben incinerarse para evitar polución.

Dimensiones: La superficie y volúmenes que se requieren para el sistema aerobio son considerablemente mayores que para el proceso anaerobio, para conseguir parecidos efectos depuradores, por lo que es menor la inversión en éste último proceso.

Proceso exterior: Por verificarse en ambientes cerrados, la producción de malos olores es baja en el proceso anaerobio, comparado con los olores desagradables del sistema aerobio, el cual se realiza en espacios abiertos.

Estabilidad del proceso: El proceso anaerobio presenta una mayor estabilidad y facilidad de arranque, después de largas o cortas paradas.

Otros:

- Reduce costos de pérdida de biomasa y de proveer nitrógeno y fósforo.
- Reduce los requerimientos de espacio de instalación.
- Minimiza los requerimientos de atención operacional
- Elimina la contaminación del aire por gases.
- Reduce los niveles de toxicidad de orgánicos clorados
- Las cargas volumétricas orgánicas son de un rango de 5-10 veces más altas que para los procesos aeróbicos.
- Los rangos de síntesis de biomasa son de sólo 5-20% de los procesos aeróbicos.
- Los requerimientos de nutrientes son de sólo 5-20% de aquellos de los procesos aeróbicos.
- La biomasa anaeróbica puede ser preservada por meses hubo años sin seria deterioración en su actividad.
- La disponibilidad de la tecnología simple y el bajo costo de los procesos de tratamiento anaerobio de alta velocidad.
- La cantidad creciente de información que se obtiene con respecto al funcionamiento de los sistemas de tratamiento anaerobio para los diversos tipos de residuos industriales:
- La mejor comprensión, de los fundamentos de la degradación anaerobia, particularmente con la factibilidad de los organismos anaerobios para eliminar los Compuestos tóxicos y/o inhibitorios. El mejor entendimiento en los procesos biológicos de casos específicos que ocurren simultáneamente con la metanógenesis.

Desventajas del proceso anaerobio

Puesta en marcha Debido a la baja velocidad de crecimiento de los microorganismos, en el proceso anaerobio la puesta en marcha de este tratamiento es más lenta que en el aerobio.

Temperatura: El tratamiento anaerobio requiere temperaturas de, al menos, 35° C, para que la actividad de las bacterias sea óptima. Este consumo de energía, cuando las aguas residuales no vengan calientes, puede ser autoabastecido por el biogás producido.

El proceso de digestión anaeróbica se recomienda para aguas cuya relación entre la DBO y la DQO sea $>$ de 0.35, es decir, aguas con alta biodegradabilidad.

Los requerimientos de energía para el tratamiento aerobio se incrementan rápidamente conforme la concentración de la materia orgánica en el agua residual es más alta. Para los sistemas anaerobios, el consumo de electricidad es mucho más bajo y virtualmente constante, ya que solamente se incluye el costo de bombeo. En general, se puede decir que el tratamiento anaerobio es más económico que el tratamiento aerobio.

ANTECEDENTES DE LOS PROCESOS ANAEROBIOS

ANTECEDENTES DE LOS PROCESOS ANAEROBIOS.

La digestión de la materia orgánica no es un fenómeno limitado a los reactores anaerobios. El hombre utilizó las capacidades de la naturaleza para fines propios: depuración de residuales, estabilización de desechos sólidos, producción de metano. El proceso es también llamado metanogénesis porque se trata de la transformación de la materia orgánica en metano. La metanogénesis 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. Sin embargo cada uno de estos ecosistemas tiene características propias, lo que hace que puedan cambiar los mecanismos metanogénicos.

Desde 1776, Alejandro Volta descubre la conversión de materiales húmedos, mediante la fermentación anaeróbica en gas metano. Este proceso ocurre en forma natural en diversos ecosistemas, por ejemplo en los rellenos sanitarios, en regiones profundas de la tierra, donde se forman grandes cantidades de gas natural y en el rumen de los animales.

En épocas más recientes en 1940, la China y la India inician el desarrollo de la tecnología de la biodigestión anaeróbica, mediante el aprovechamiento de los desechos agrícolas y los estiércoles animales y excrementos humanos, con fines energéticos y producción de abono orgánico.

Tabla 8. Residuos que pueden tratarse por digestión anaerobia.

| Residuos industriales | Residuos de la agricultura | Residuos urbanos |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Industria cervecera ▪ Industria lechera ▪ Industria alimenticia ▪ Industrias químicas ▪ Industrias farmacéuticas Industria vinícola, etc. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ganadería porcina ▪ Ganadería avícola ▪ Ganadería de vacuno ▪ Residuos de granjas ▪ Productos residuales: de cosechas, etc. ▪ Despojos animales. | Lodos: principalmente: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Agua residual bruta. ▪ Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FO de RSU) |

La aplicación de la degradación anaerobia en la producción pecuaria, es factible prácticamente en cualquier nivel o clase de actividad. Así, se han realizado ensayos para tratar desechos de aves, cerdos, ganado vacuno y de todo tipo de animal criado de forma controlada. Muchos de dichos ensayos han llegado a ser a nivel de gran escala y son aplicables en sitios en los que la crianza de animales es una actividad sistematizada y tecnificada.

Tabla 9. Reactores a escala comercial construidos en el mundo hasta enero del 2003 para tratar diferentes tipos de aguas residuales y de drenaje.

| TIPO DE AGUA RESIDUAL | TIPO DE REACTOR | | | | | | Total |
|--------------------------------------|-----------------|-----|-----------|------------|------|------|-------|
| | Rango bajo | AC | Cama fija | Cama móvil | UASB | EGSB | |
| Industria alimenticia | | | | | | | |
| Cervecería y malta | 2 | - | 6 | 4 | 185 | 88 | 285 |
| Destilería y etanol | 25 | 31 | 40 | - | 76 | 9 | 181 |
| Otras bebidas | - | 3 | 11 | 2 | 88 | 15 | 119 |
| Producción de azúcar | - | 49 | 7 | 1 | 32 | 3 | 92 |
| Procesamiento de papa | 14 | 4 | 2 | - | 46 | 10 | 76 |
| Leche, helados y queso | 12 | 10 | 10 | 2 | 27 | 6 | 67 |
| Producción de almidón | 2 | 9 | 10 | 2 | 34 | 7 | 64 |
| Producción de levadura | 7 | 8 | 6 | - | 25 | 8 | 54 |
| Dulces y confitería | 4 | - | 3 | - | 15 | 2 | 24 |
| Producción de ácido cítrico | 2 | 3 | 1 | 1 | 3 | 5 | 15 |
| Procesamiento de café | - | - | 7 | - | 4 | 1 | 12 |
| Procesamiento de vino | - | - | 6 | 1 | 3 | 1 | 11 |
| Procesamiento de pescado | 1 | 4 | - | - | 2 | 1 | 8 |
| Misceláneos | 10 | 22 | 40 | 5 | 112 | 25 | 214 |
| Industria no-alimenticia | | | | | | | |
| Papel y pulpa | 1 | 16 | 5 | 3 | 75 | 37 | 137 |
| Petroquímica | 3 | 4 | 43 | 1 | 20 | 20 | 91 |
| Lixiviación | - | - | 6 | - | 18 | - | 24 |
| Farmacéutica | 4 | 1 | 2 | - | 6 | 3 | 16 |
| Ganadería/fertilizantes | 5 | 3 | 6 | - | 1 | - | 15 |
| Textil | - | - | 1 | - | 4 | 2 | 7 |
| Hule natural | - | - | 3 | - | 3 | - | 6 |
| Sedimentos | 1 | - | 2 | 1 | 1 | - | 5 |
| Manufactura de tabaco | - | - | - | - | 4 | - | 4 |
| Tenería | - | - | - | - | 3 | - | 3 |
| Desulfuración de gases de combustión | - | - | - | - | - | 1 | 1 |
| Componentes electrónicos | - | - | - | - | 1 | - | 1 |
| Drenaje | - | - | 2 | 1 | 64 | - | 67 |
| # de reactores por tipo | 93 | 167 | 219 | 24 | 852 | 244 | 1599 |

AC: anaerobic Contact. UASB: Upflow Anaerobic Sludge Bed. EGSB: Expanded Granular Sludge Bed. Fuente: Chemical Engineering, April 2003.

Las tecnologías anaerobias no pueden reemplazar completamente al tratamiento aerobio. Una planta de tratamiento que combine los procesos aerobio y anaerobio, es más recomendable y rentable que un tratamiento aerobio solo. La experiencia demuestra que es posible llevar al doble la capacidad del tratamiento a través de un sistema combinado sin un incremento significativo en los costos de operación.

Tabla 10. Muestra de reactores anaerobios construidos entre 1989-2003.

| Construcción | Compañía y ubicación | Producción industrial que genera el agua residual | Tipo de reactor | Carga orgánica ton dgo/d | % de dgo removida | Constructor |
|--------------|---|---|-----------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| 1989 | Ik Chemical, Hyogo, Japón | Materia prima de tintas | UAF | 4.8 | 80 (DBO ₅) | Sinko Pantec |
| 1992 | Taiwan | PET | UASB | 6 | | Global Water Engineering |
| | Changzho Worlbest Racidi, China | PET | HIBRIDO | 1.7 | | Biolim |
| | BP Amoco, Cooper River, SC, USA | PTA | DAF | | 80-85 (TOC) | BP-Amoco |
| 1994 | Baek HWA Co. Korea | Alcoholes | EGSB | 2.5 | 75** | Biothane |
| 1996 | APR, Kamalapuram, India | Pulpa de rayón | UASB | 40 | 65** 85(DBO ₅) | Paques |
| 1996 | Copenor, Brasil | Formaldehido, ácido fórmico, formato de sodio, polioles, hexametilamina | EGSB | 2.2 | 60** | Biothane |
| 1997 | Eastman Chem. Co. Singapur | | EGSB | 12.5 | 92 | Biothane |
| 1997 | Hyosung Industries, Korea | Plásticos | EGSB | 0.9 | 75** | Biothane |
| 1997 | Procter & Gamble, Indonesia | Jabones y detergentes | HIBRIDO | 3 | 70** | ADI |
| 1997 | M. Gas Chemical Okayama, Japón | PTA | UASB | 6(DBO ₅) | 75(DBO ₅) | Sinko Pantec |
| 2000 | BP-Amoco Chem., Kuantan, Malasia | PTA | IC | | | Paques |
| 2000 | SKW Trotsberg, Alemania | Metalúrgica | EGSB | 6.7 | 80** | Biothane |
| 2000 | Borsudchem Co., Hungría | PU, PVC | EGSB | 10.7 | 80** | Biothane |
| 2000 | Reliance Industries, Maharashtra, India | PTA | EGSB | 25.2 | 70** | Biothane |
| 2000 | Sam Nam Petrochemicals, Korea | PTA | HIBRIDO | 6 | 75** | ADI |
| 2000 | PT Bakrie Kasei Corp., Indonesia | PTA | HIBRIDO | 18.8 | 75** | ADI |
| 2001 | Getec, Brasil | Sorbitol, manitol, aditivos alimenticios | IC | 7.5 | 80 | Paques |
| 2001 | Yizheng Chem. Fiber, China | PTA | UAF | 81.6 | 80** | Global Water Engineering |
| 2001 | Interquia, Canadá | PTA | EGSB | 26.3 | 75** | Biothane |
| 2001 | Toray Industries Tokai, Japón | PTA | IC | 16.8 | 75 | Paques |
| 2002 | SUT IWWT, Singapur | Varios (13 plantas químicas) | EGSB | 20.8 | 60** | Biothane |
| 2002 | Procter & Gamble, Tailandia | Jabones y detergentes | HIBRIDO | 2.7 | 75** | ADI |
| 2003 | Celanese, Cangujeira, México | Alcoholes, derivados de ácido acético, aminas, cetonas y acrilatos | HIBRIDO | 9.6 | >90** | Celanese |

PET=Tereftalato de polietileno; PU=Políuretano; PVC=Cloruro de polivinilo; TOC=Carbón orgánico total.

Tabla 11. Compuestos orgánicos que pueden ser tratados con digestión anaerobia

| Compuestos aromáticos (homocíclicos y heterocíclicos) | |
|--|---|
| Benceno Mefil benceno (To/ueno) 1,2-dimethylbenceno (o-xileno) | Hidroxibenceno (fenol) o-aminofenol o, m, p-cloro, hidroxí, metoxi y nitrofenol 2,4 -dicloro;3,4-dicloro y 3,5-diclorofenol pentaclorofenol trihidroxibenceno m, p-metilfenol (m, p-cresol) 2,6-dimetoxifenol |
| Carboxybenzene (benzoato) o,m, p-amino, cloro, iodo, metil y mefoxybenzoate o-nitrobenzoato mono, di, tri-hidroxibenzoato 3,5-diclorobenzoato 3-chloro, 4-hidroxibenzoato 2-acetilbenzoato (acetilsalicilato) 3,4,5-trimefoxybenzoato 4-hidroxí-3- metoxybenzoato 4-hidroxí-3,5-dimetoxibenzoato | Nitrobenenceno 3-nitrobenenceno sulfonato |
| o, m, p-dicarboxibenceno (ftalatos) dimetil o-phthalato y p-ftalato dietil o-ftalato di-n-butil o-ftalato Butilencil o-ftalato | fenilacetato fenilpropionato (cinnamafe) fenilpropionato (hidrocinnamate) 3-metoxi-4-hidroxí cinnamate 4-hidroxifenilalanina (tirosina) |
| Formilbenceno (benzaldehído) 4-hidroxí-3,5-dimetoxibenzaldehído Formilbenceno (benzaldehído) 4-hidroxí-3-metoxi- benzaldehído | Bencil alcohol 4-hidroxí bencil alcohol 2-furaldehído (furfural) |
| Compuestos Alifáticos | |
| Cianuro de Hidrógeno | Alcoholes C1 a C8 n-hidroxialcanos i-butanol l-amino-2-propanol 3-metilbutanol butileno, etileno y propileno glicol (diols) di, tri y polietilen glicol (mayores de PM=20000) glicerol (triol) |
| Ácidos C1 to C18 n-carboxialcanos 4-aminobutirico glixálico 2-hidroxipropanoico (láctico) 3-hidroxibutanoico y propanoico i-butirico y <i>i-valérico</i> acrílico, β-metilacrílico (crotónico) y 2-propenilacrílico (sorbico) C2 fo C6 n-dicarboxialcanos 4-aminoadípico <i>cis</i> y <i>trans</i> - 1,2-etilendicarboxílico (maleico y fumárico) 2-hidroxí-1,2,3-propanetricarboxílico(cítrico) | Esteres etil, metil y vinil acetato butil, etil y metil acrilato metil n-, i-butirato y propionato |
| Aldehídos C1 a C4 n-formilalcanos 2-bufenal (crotonaldehído) 2-propenal (acroleína) | Éteres etilen glicol monometil éter (2-metoxietanol) etilen glicol monoetil éter (etoxietanol) metil butil éter |
| Aminas sec-butilamina metil, dimetil, etildimethyl y trimetilamina trietanolamina | Cetonas acetona metil etil cetona |

Parámetros de operación y control en los procesos anaerobios

Para un buen control, seguimiento y optimización anaerobio es necesario tener en cuenta los siguientes parámetros:

| Parámetros de operación |
|---------------------------------|
| Fase de arranque |
| Carga orgánica |
| Velocidad de carga orgánica |
| Toxicidad |
| Temperatura |
| Velocidad volumétrica de flujo |
| Tiempo hidráulico de residencia |
| Nutrientes |
| Producción de fangos |

| Parámetros de control |
|--|
| Concentración de ácidos volátiles |
| Alcalinidad y pH |
| Sólidos suspendidos, volátiles y totales |
| Producción de metano y gas total |

Factores económicos en los procesos anaerobios

Al contemplar estos procesos como un medio de descontaminación ambiental, se ha de tratar de encontrar la alternativa más adecuada a cada problema, de forma que permita obtener algunos beneficios, a fin de recuperar la inversión en un plazo de tiempo lo más corto posible.

En una primera etapa deben hacerse los análisis de las aguas residuales a tratar, así como el de los efluentes, en plantas piloto. Esto nos dará orientaciones sobre la posible viabilidad económica del proceso.

Al elaborar el estudio económico deben considerarse los factores:

Previos a la inversión

- Ubicación, y dentro de éste: Captación y vertido de aguas, topografía del terreno, espacio disponible, construcción necesaria y requerimientos legales del vertido.
- Pre-tratamientos del agua residual, si fuesen necesarios.
- Tipo y cálculo del tamaño del Digestor o digestores. Carga en DQO o DBO₅, sólidos volátiles producidos, volumen de metano/día previsto, volumen del fango, porcentaje de estabilización.

Presupuesto de inversión

- Costo de los principales equipos de la instalación.
- Costo de los equipos auxiliares e instrumentación.
- Contratos, costo del montaje y puesta en marcha de la Planta.
- Ingeniería, patentes y seguros, imprevistos.

Costo de explotación

- Gastos fijos: amortización, mantenimiento, administrativos.
- Gastos variables o de operación: electricidad, nutrientes y otros productos, mano de obra.

Economía-Ingresos

- Beneficios obtenidos por utilización del biogás.
- Beneficios empleo subproductos y efluentes.

Rentabilidad

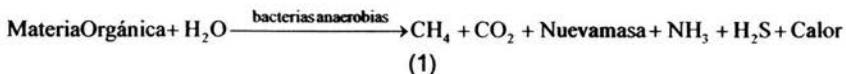
Este tipo de plantas se consideran rentables cuando el retorno del capital invertido sea < 6 años. Para su cálculo hay que considerar los puntos anteriores, teniendo en cuenta que:

- Cada kg de DQO eliminada produce 0.35 m^3 de $\text{CH}_4 = 3.600 \text{ kcal}$.
- Los fangos finales sean usados como fertilizantes o combustibles, y el efluente para riegos o retorno a fabricación.

III. BIOQUÍMICA DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Bioquímica de la digestión anaerobia

Por definición, el proceso bioquímico de Digestión Anaerobia (D. A.), es: *"la utilización de microorganismos, en ausencia de oxígeno, para estabilizar la materia orgánica por conversión a metano y otros productos inorgánicos incluyendo dióxido de carbono"*.



En la Digestión Anaerobia (D. A.), la materia orgánica del fango o agua residual se transforma en metano y CO₂ mediante grupos o comunidades de bacterias en recipientes cerrados (reactores). El gas producido puede ser recogido y utilizado como combustible. El fango final, estabilizado, que se extrae no es putrescible, y su contenido en organismos patógenos es nulo o muy bajo.

La digestión ocurre en tres etapas básicas. Estas etapas se encuentran ligadas entre sí ya que los productos que se obtienen se emplearán en la siguiente fase (ver figura 2):

1. Hidrólisis y Fermentación.
2. Acetogénesis.
3. Metanogénesis.

La D. A. se emplea en todo el mundo para la depuración de aguas residuales y fangos de la industria, la agricultura y de origen urbano. Recientemente se aplica también al tratamiento de residuos sólidos urbanos.

Frecuentemente este proceso se emplea como primera etapa de tratamiento en residuos de alta carga orgánica. El objetivo en el uso de la D. A. es el de reducir las altas cargas orgánicas a valores de DQO que puedan emplearse en procesos aerobios tradicionales, típicamente en los procesos de fangos activados. Por tanto, la D. A. no es un proceso de tratamiento de aguas residuales completo en sí mismo. Es una adición a los procesos aerobios convencionales.

MICROBIOLOGÍA DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

En la D. A. se reconocen cuatro tipos diferentes de grupos microbiológicos tróficos (bacterias), asegurándose por lo tanto la continuidad y estabilidad del proceso gracias al efecto acumulativo de estos cuatro grupos. Las cuatro etapas del metabolismo necesarias para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos se definen en la Figura 2.

Inicialmente, la masa de polímeros complejos como proteínas, hidratos de carbono, lípidos, grasas y aceites se *hidrolizan* por la acción de enzimas extracelulares en productos solubles más sencillos de tamaño tan pequeño que les permite atravesar la membrana celular de los microorganismos. Estos compuestos sencillos de aminoácidos, azúcares, ácidos grasos y alcoholes *fermentan* en ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, amoníaco, hidrógeno y CO_2 . Los ácidos grasos de cadena corta que no se encuentran en forma de acetatos se *convierten en acetato*, hidrógeno y CO_2 . La *etapa final es la producción de metano* a partir del hidrógeno mediante metanógenos hidrogenofílicos y a partir de acetatos mediante metanógenos acetoclásticos. El proceso anaerobio se divide en siete subprocesos que se detallan a continuación:

- Hidrólisis de la materia orgánica particulada compleja.
- Fermentación de los aminoácidos y azúcares.
- Oxidación anaerobia de los ácidos grasos de cadena larga y alcoholes.
- Oxidación anaerobia de los productos intermedios.
- Producción de acetato a partir de CO_2 y H_2 .
- Conversión del acetato a metano, mediante metanógenos acetoclásticos.
- Producción de metano mediante los metanógenos hidrogenofílicos a partir de CO_2 y H_2O .

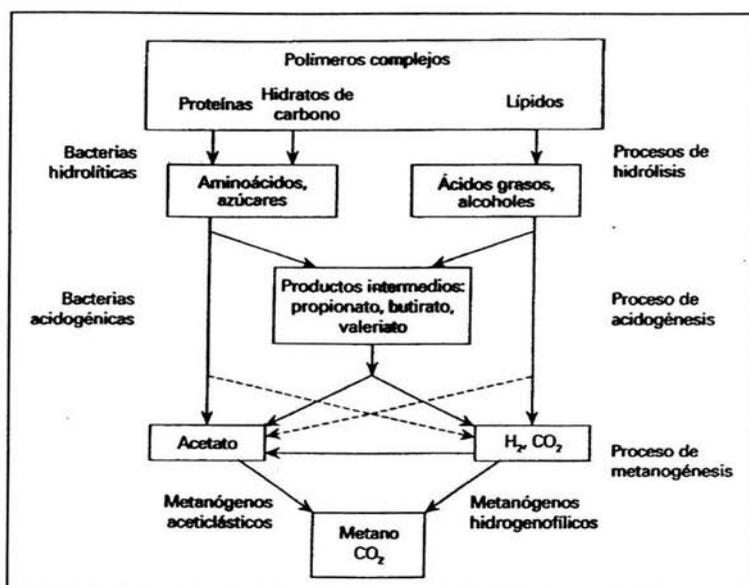


Figura 2. Etapas en la producción de metano a partir de residuos orgánicos.

Los agentes biológicos de la D. A. son las bacterias aunque algunos ciliados fermentadores, protozoos flagelados y algunos hongos anaerobios pueden jugar un papel importante en algunos sistemas. A continuación se describen brevemente las actividades de los cuatro grupos tróficos.

La amplia gama de géneros y especies indica la naturaleza compleja de las poblaciones microbianas. Asimismo las densidades de población en cada una de las etapas (en fangos de aguas residuales) poseen unos valores entre 10^5 y 10^9 por ml. Las bacterias que intervienen en la digestión anaerobia se encuentran en unos rangos de pH entre 6 y 8 con un valor próximo a 7 para la actividad óptima. Los ácidos grasos volátiles disminuyen el pH a menos que la alcalinidad bicarbonatada sea suficiente para neutralizar dichos ácidos. El bicarbonato se forma a partir de CO_2 , que es soluble en el agua, cuando reacciona con los iones hidroxilo formando iones bicarbonato, HCO_3^- . Es importante que haya suficiente alcalinidad todo el tiempo, hasta un nivel de - 3.000 Mg/l, para mantener una amortiguación suficiente.

Tabla 12. Algunas especies bacterianas de la digestión anaerobia.

| Etapa | Género/especie | Población mesófila en lodos de depuradoras |
|---|--|--|
| Acidogénicos hidrolíticos | <i>Butyrivibrio</i> , <i>Clostridium</i> , <i>Ruminococcus</i> , <i>Acetivibrio</i> , | 10 ⁸ -10 ⁹ por ml |
| Acetogénicos homoacetogénicos | <i>Eubacterium</i> , <i>Peptococcus</i> , <i>Lactabacillus</i> , <i>Streptococcus</i> , etc. | 10 ⁵ por ml |
| Acetogénicos reductores de protones obligados | <i>Acetobacterium</i> , <i>Acetogenium</i> , <i>Eubacterium</i> , <i>Pelobacter</i> , <i>Clostridium</i> , etc. | |
| Metanogénicos | <i>Methanobacillus omelionskii</i> , <i>Syntrophobacter wolinū</i> , <i>Syntrophomonas wolfei</i> , <i>Symtrophus buswellii</i> , etc. <i>Methanobacterium</i> (muchas especies), <i>Methanobrevibacter</i> (muchas especies), <i>Methanococcus</i> (muchas especies), <i>Methanomicrobium</i> (muchas especies), <i>Methanogenium</i> (muchas especies), <i>Methanospirillum hungatei</i> , etc. | 10 ⁸ por ml |

Las bacterias metanogénicas suelen ser la población limitante.



Figura 3. Organismos asociados al tratamiento biológico del agua residual.

| Insectos (x5) números 1 a 4 | |
|---|--|
| 1. Cola en espiral acuática, Podura; el género que se encuentra en los filtros rociadores en <i>Achorutes</i> . 2. larva de los gusanos rojos, <i>Chironomus</i> . | 3. larva de la mosca de los filtros, <i>Psychoda</i> 4. pupa de la mosca de los filtros <i>Psychoda</i> . |
| Protozoarios (X150) números del 5 al 17 | |
| 5. <i>Didinium</i> 6. <i>Euglena</i> 7. <i>Chaenea</i> 8. <i>Lionotus</i> 9. <i>Colpidium</i> 10. <i>Stylonychia</i> | 11. <i>Vorticella</i> 12. Ameba 13. Arcella 14. <i>Paramecium</i> 15. <i>Oprcularia</i> 16. <i>Anthophysa</i> 17. <i>Oikomonas (X1500)</i> |
| Bacterias y hongos (X1500) numerosos del 18 al 23 | |
| 18. <i>Thiospirillum</i> 19. <i>Zooglea ramigera</i> 20. <i>Streptococcus</i> | 21. <i>Leptomitus</i> 22. <i>Sphaerotilus</i> 23. <i>Beggiatoa</i> |

Hidrólisis y Fermentación

La 1ª. etapa de la digestión anaerobia se efectúa fuera de la célula mediante la acción de enzimas extracelulares de las bacterias, que hidroliza las moléculas de alto peso molecular (celulosa, proteínas, carbohidratos y lípidos), que se encuentran en suspensión o disueltas a compuestos de menor peso molecular como son azúcares, aminoácidos y péptidos. Esta fase se conoce como la fase de "licuefacción", posteriormente estos compuestos son fermentados y transformados a compuestos intermedios de menor peso molecular, como son los ácidos grasos de cadena larga, alcoholes, CO₂ y amonio.

En esta etapa no se obtiene una remoción significativa de DQO, debido a que sólo se está requiriendo un pequeño consumo de materia orgánica para la transformación de las moléculas orgánicas complejas en otras más sencillas.

Estas sustancias quedan transformadas y reducidas a otros compuestos orgánicos de cadena molecular más corta, principalmente en ácidos grasos volátiles y gases CO₂ y H₂.

Por ejemplo, si partiésemos de polisacáridos, el proceso sería:



Una de las reacciones que se darían en este caso típico sería:



Este metabolismo anaerobio lo realizan bacterias de crecimiento rápido (formadoras de ácidos), que fermentan la glucosa para producir los mencionados ácidos. El pH de la operación suele ser inferior a 7.

Bacterias formadoras de ácido

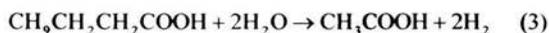
Este grupo de bacterias (microorganismos facultativos y anaerobios estrictos) rompen las moléculas hasta llegar a ácidos grasos volátiles que son compuestos lo suficientemente pequeños para ser aprovechados por las bacterias formadoras de metano. Subsisten en un amplio rango de condiciones pH moderadamente ácidos o alcalinos (3.8 a 8.0), soportan temperaturas que van desde un medio cálido hasta condiciones de congelamiento y pueden reproducirse en minutos, (pueden lograr su duplicación en 30 minutos).

Fase acetogénica

En esta etapa unas bacterias llamadas acetogénicas convierten Los compuestos producidos durante la primera etapa (las moléculas orgánicas de pequeño tamaño y los ácidos grasos volátiles) en hidrógeno, CO₂, acetato, ácido acético, ácido propiónico, y otros ácidos orgánicos de bajo peso molecular

Las principales bacterias que llevan a cabo estas transformaciones son acetogénicas y formadoras de ácido.

La reacción sería, siguiendo el ejemplo anterior:



Acido butírico + agua → Acido acético + hidrógeno

Bacterias productoras de ácidos grasos

Fermentan glucosa para producir CO₂, H₂ y ácidos como el acético, el propiónico y el butírico, dependiendo de la concentración de hidrógeno que hay en el medio, de acuerdo a las siguientes reacciones:





Cuando la concentración de H_2 en el gas producido durante la degradación es muy baja (5 a 50 ppm) existe una preferencia para la formación del ácido acético, en cambio cuando aumenta la concentración de H_2 , disminuye la proporción de ácido acético y aumentan las cantidades de ácidos de cadena mayor.

Bacterias acetogénicas

Son cruciales para una fermentación metanogénica completa. Los ácidos grasos con bajo peso molecular (propionatos y butiratos) son productos intermedios que no pueden ser catabolizados por las metanogénicas.

El catabolismo del butirato lo pueden realizar algunas bacterias como son la *Syntrophomonas wofeii* procesando por vía de β -oxidación para producir acetato e hidrógeno o formato.

La oxidación del propionato es generada por bacterias como la *syntrophobacter wolinii* produciendo ácido acético y CO_2 con formación de hidrógeno o formato. Estas oxidaciones son termodinámicamente posibles, sólo cuando los productos reducidos (hidrógeno o formato), son mantenidos en bajas concentraciones.

Los microorganismos que oxidan butirato y propionato a acetato e hidrógeno crecen muy lentamente, en especial en la presencia de metanogénicas. El tiempo de generación para las *Syntrophomonas wofeii*, es cercano a tres días y para las *syntrophobacter wolinii*, de siete días. La tabla 8 muestra algunas de las reacciones acetogénicas más comunes.

Tabla 13. Reacciones acetogénicas más comunes.

| OXIDACIÓN (REACCIONES DONANDO ELECTRONES) | |
|--|--|
| Propionato acetato | |
| $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + \text{HCO}_3^- + 3\text{H}_2$ (7) | |
| Butirato acetato | |
| $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$ (8) | |
| Etanol acetato | |
| $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$ (9) | |
| Lactato acetato | |
| $\text{CH}_3\text{CHOHCOO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + \text{HCO}_3^- + 2\text{H}_2$ (10) | |
| Respiración (reacción aceptando electrones) | |
| $\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{acetato}$ | |
| $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 4\text{H}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{H}_2\text{O}$ (11) | |

Metanogénesis

En esta 3ª. etapa, las bacterias metanogénicas (anaerobias estrictas) son esenciales para este tipo de digestión, por ser los únicos microorganismos que pueden catabolizar anaerobiamente el ácido acético e hidrógeno para dar productos gaseosos en ausencia de energía lumínica y oxígeno.

En esta 3ª etapa se obtiene la estabilización completa del residuo, efectuándose la conversión de los compuestos intermedios a productos finales más simples, de los cuales los principales son el metano y el CO_2 , aunque pueden existir pequeñas cantidades de otros compuestos como son el sulfuro de hidrógeno (H_2S), mercaptanos (RSH) e hidrógeno (H_2), en este proceso van a trabajar dos grupos de bacterias formadoras de metano. El 1er. grupo produce metano a partir de hidrógeno y CO_2 y el 2º. grupo convierte el acetato a metano y bicarbonato (CO_2 en solución). Ambos grupos de bacterias son anaerobias.

En la 1ª etapa el rompimiento de los compuestos orgánicos complejos a ácidos grasos es lento, aún cuando los microorganismos que proveen las enzimas se desarrollan rápidamente. Por otro lado, también se tienen compuestos orgánicos que difícilmente se pueden degradar. Para lograr un grado de conversión máximo se requieren tiempos de retención largos y rangos de baja carga orgánica. Otro factor limitante dentro de la 1ª etapa son los rangos bajos de temperatura de operación. La degradación de lípidos prácticamente sólo se realiza arriba de los 20°C, lo que significa que la 1a. etapa podría limitar el rango de remoción de la materia orgánica.

En la 2a. etapa, la conversión de ácidos grasos orgánicos a ácidos grasos volátiles, principalmente el ácido acético, generalmente se realiza prontamente sin ser un factor limitante. Los microorganismos de esta etapa desarrollan y degradan los ácidos grasos rápidamente.

El factor limitante en la 3a. etapa son las bacterias formadoras de metano, estos microorganismos se desarrollan lentamente y son notablemente sensibles a las características del medio. Las bacterias formadoras de metano generalmente constituyen el grupo organismos que limita la acción de la digestión anaerobia.

Para un óptimo trabajo, el elemento acuoso circulante debe tener un pH entre 6.6 y 7.6.

Continuando con el anterior ejemplo, se verificarían las reacciones finales siguientes:



Acido acético + bacterias acetoclastas → bióxido de carbono + metano



Bióxido de carbono + Hidrógeno → agua + metano

La temperatura es un factor muy importante para que se verifiquen éstas transformaciones metabólicas.

Para que un sistema de tratamiento anaerobio estabilice correctamente el residuo orgánico, deben hallarse en estado de equilibrio dinámico los microorganismos formadores de ácidos y metano, es decir, las reacciones deben producirse continua y sucesivamente, ya que el funcionamiento anormal de una de ellas, dará lugar al mal funcionamiento global del proceso.

Muchos microorganismos metanogénicos son similares a los encontrados en el estómago de los animales rumiantes. Se considera que una de las reservas mundiales de gas natural tiene su origen en la actividad metabólica de estas bacterias.

Bacterias formadoras metano

Aprovechan los ácidos grasos volátiles que forman las bacterias acetogénicas y reducen a metano y CO₂, estos microorganismos son anaerobios estrictos. Necesitan de mayores cuidados que las formadoras de ácido, (las condiciones a las que pueden adaptar son más restringidas). El pH de entre 6.0 y 8.0, pero su pH óptimo está entre 7.0 y 7.2, temperaturas de 20-42°C, aunque su ideal está en 35°C, se inhiben con pequeñas cantidades oxígeno (cerca de 3mg/L). Se reproducen una vez cada tres o cinco días, este lento crecimiento constituye una de las bases más importantes para las características de los procesos anaerobios en general.

Bacterias metanogenas hidrogenófilas

Utilizan el hidrógeno producido en la oxidación anaerobia para reducir el CO₂ a CH₄, de acuerdo con la reacción:



Esta reacción proporciona una doble ventaja al producir metano por un lado y eliminar el hidrógeno gaseoso por el otro. Las bacterias formadoras de metano pueden ser adversamente afectadas por la acumulación de hidrógeno, por lo cual es importante mantener un bajo nivel de hidrógeno para que estas especies contribuyan eficientemente a la conversión del sustrato.

Bacterias metanógenas acetilclásticas

Producen metano a partir el ácido acético. Su tiempo de duplicación es lento 2-3 días. Normalmente alteran el pH del medio debido la eliminación de ácido acético y la producción de CO₂ que al disolverse forma una solución amortiguadora de bicarbonato. Los principales exponentes de las metanogénicas acetilclásticas son la *Methanosarcina* y la *Methanosaeta* (*Methanothrix*). Las bacterias metanogénicas acetilclásticas son vulnerables a la competencia de las hidrogenofilicas cuyo tiempo de reproducción es de 1-6 horas.



Microorganismos anaerobios

Los microorganismos encargados de la descomposición de la materia orgánica están conformados principalmente por dos grupos:

1. **Bacterias formadoras de ácido:** convierten el material de desecho en ácidos grasos volátiles (AGV) y otros productos intermedios: Bacterias productoras de ácido (butírico y propiónico). Bacterias acetogénicas (acetato e hidrógeno).
2. **Bacterias formadoras metano,** convierten los productos de la 1ª etapa en metano y CO₂: Bacterias metanógenas hidrogenófilas (hidrógenofilicas). Bacterias metanógenas acetilclásticas (acetofilicas).

Parámetros que afectan el funcionamiento de un sistema anaerobio

Para que la degradación de la materia orgánica sea eficiente y los desechos se conviertan a metano y CO_2 , se requiere que los microorganismos tengan un ambiente propicio y se cumplan sus requerimientos nutricionales. En primera instancia se necesita alimento, que en este caso es la materia orgánica soluble que se encuentra en el agua residual, la cual se puede cuantificar con valores de DQO, DBO y flujos. También se necesita adicionar nutrientes, siendo los más importantes el nitrógeno y el fósforo. Deben mantenerse rangos definidos de pH y temperatura, los cuales son proporcionados por las necesidades de las bacterias formadoras de metano que son los organismos más sensibles. Estos factores están interrelacionados y forman la base del área del dimensionamiento de reactores anaerobios

Características de la fase sólida

El lodo se compone principalmente por biomasa, con una cantidad variable de sólidos orgánicos inertes y precipitados inorgánicos. Aunque pueden determinarse algunas propiedades físicas, como densidad, viscosidad (en lodos floculentos) o resistencia a la compresión (en lodos granulares), las magnitudes más importantes son la velocidad de sedimentación de los lodos granulares y el índice volumétrico de lodos (IVL).

Una de las características importantes del agua residual en cuanto a la elección del tipo reactor es la presencia de material refractario (no biodegradable).

Si material refractario es soluble y no tóxico, o tóxico pero presente en concentración subinhibitoria, este no afecta al reactor ya que pasa por el mismo sin ser alterado; pero produce la calidad del efluente; el material refractario

particulado, puede permanecer dentro del reactor y conducir a una acumulación de sólidos, ocupando volumen útil del mismo.

Estas razones definen la importancia de la determinación de la naturaleza y la composición de los sólidos suspendidos de un agua residual. Esta caracterización permite la definición de un criterio de velocidad de carga *máxima* del sistema, cuando se equilibra la velocidad de acumulación de los sólidos con la velocidad de producción neta de biomasa.

La determinación de sólidos totales y volátiles, sirve para el cálculo de la cantidad total del lodo presente en el reactor, de debe apreciar el valor del contenido en cenizas, ya que es un indicador del grado de mineralización.

Cantidad de lodos

La obtención de un perfil de lodo (medida de la concentración de ST y SV a lo largo del reactor) permite el cálculo de la cantidad absoluta de lodo en el reactor. Este valor, junto con el de la actividad metanogénica específica del lodo, delimitan la carga máxima (kg DQO por m³ por día) aplicable al sistema, por lo que su conocimiento es tanto más deseable cuanto más forzada es la operación.

Características del agua residual

El caudal es una de las variables a medir en todo tratamiento anaerobio. Por un lado, esta magnitud está involucrada en gran parte de las definiciones de parámetros tan importantes durante la operación del reactor como la velocidad carga orgánica o la carga de lodo. También define la velocidad superficial del líquido dentro del reactor, que condiciona la sedimentación y, por tanto, la retención de la biomasa en el sistema. El aumento de caudal, especialmente en aguas residuales industriales concentradas (no tanto en aguas urbanas), conlleva un aumento de la carga orgánica aplicada, un aumento en la producción de gas (con el consiguiente aumento en la velocidad superficial del fluido) y un mayor lavado de biomasa. La homogeneidad del

agua residual debe tenerse en cuenta a la hora de juzgar o evaluar el comportamiento de una instalación, como una de las cualidades más importantes del agua residual. La ausencia de picos en las concentraciones de materia orgánica y en los valores de pH (tanto ácidos como básicos) así como el correcto balance de alcalinidad y, temperatura, aseguran una operación regular y estable. En los casos anteriores y en los que se prevean caudales variables, descargas intermitentes o situaciones de emergencia, la presencia de un tanque "igualador" de dimensiones adecuadas es altamente recomendable

Materia orgánica

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. Dada la posibilidad de separar por filtración los diversos componentes del agua residual, la DQO de los filtrados permite cuantificar la presencia de diferentes fracciones - total (sin filtración alguna, que incluye SSV en el influente, y biomasa y SSV en el efluente), - soluble, utilizando membranas de 0.45 micrómetros de poro.

pH

Los grupos bacterianos dependiendo de su tipo tienen diferentes pHs óptimos para su reproducción y desarrollo, por ejemplo, para las bacterias acidogénicas su pH óptimo se encuentra entre 5 y 6.5 y para las bacterias metanogénicas es por arriba de 6.5, pero se sabe que todas las bacterias trabajan bien en un intervalo de pH cercano al neutro (6.3-7.8) y que su óptimo está entre 7.0 y 7.2.

El pH es uno de los factores que más influencia tiene sobre el sistema microbiológico, la proporción de algunos compuestos como son H_2S , NH_4^+ y ácidos grasos volátiles (los cuales pueden llegar a ser tóxicos para las bacterias anaerobias) dependen del pH del medio.

Temperatura.

La clasificación sobre la base de la temperatura se divide en tres tipos, dependiendo del intervalo de temperatura en el que se desarrollan.

- Psicrófilos (0-20°C)
- Mesófilos (20-40°C)
- Termófilos (40-650°C)

Los procesos anaerobios normalmente trabajan en un intervalo mesófilo, de 20-40°C, en el cual el óptimo se encuentran alrededor de los 35-37°C, que es donde se tiene el valor cinético más elevado. Cuando la temperatura desciende de estos valores óptimos, también su metabolismo disminuye, de tal manera que convierten una menor cantidad de alimento. Los cambios de temperatura en el intervalo mesófilo pueden ser tolerados, pero con un descenso a valores menores la carga orgánica aplicada al proceso se debe disminuir. A temperaturas mayores de 42°C, se puede causar un daño muy severo a las bacterias mesófilas, inhibiendo o eliminándolas definitivamente.

Los procesos termófilos alcanzan velocidades de reacción superiores a los sistemas psicrófilos o los mesófilos, pero para mantener este rango de temperaturas se requiere del suministro de energía externa, por lo que estos sistemas son poco utilizados. La temperatura óptima para los microorganismos termófilos se encuentra a los 55°C.

Ácidos grasos volátiles (AGV)

Para la evaluación de las condiciones de un sistema anaerobio se requiere analizar las sustancias que aparecen como productos intermedios de la digestión anaerobia, estos compuestos pueden ser variados, pero por su alta concentración se emplean como marco de referencia a los ácidos grasos volátiles.

Los AGV son un indicativo del grado de acidificación en el agua. Si se presenta una acumulación de AGV, es una señal que se tienen problemas

dentro del sistema ya que las bacterias formadoras de metano presentan dificultades para degradar los productos generados por las formadoras de ácido.

Ácidos volátiles (AV)

La mayor parte de los fallos en las plantas anaerobias se deben a problemas de acidificación del reactor, causados por una falta de alcalinidad en el sistema, especialmente durante las etapas de arranque. Esta acidez se produce con relativa rapidez por la acción de bacterias hidrolíticas y acidogénicas, formándose ácidos de cadena corta. Las concentraciones de AV varían de manera muy sensible a los cambios de los parámetros del proceso.

Considerando el caso simplificado de una sobrecarga orgánica, puede observarse secuencialmente en el reactor anaerobio los siguientes efectos:

- 1) Aumento en la concentración de hidrógeno en el gas y aumento en la concentración de otros gases traza (como el CO_2).
- 2) El aumento consecuente en la producción de gas. En caso de sobrepasar la capacidad máxima de las bacterias metanogénicas, podría existir:
- 3) una acumulación de AV.
- 4) consumo de alcalinidad de bicarbonato: variación de los valores de las relaciones de alcalinidad; pequeña variación de la alcalinidad global; aumento en la relación AGV/alcalinidad.
- 5) síntesis de AGV de cadena larga, incluso sus isómeros. Si la cantidad de AGV sigue aumentando:
- 6) agotamiento de la reserva alcalina (alcalinidad del bicarbonato).
- 7) aumento apreciable del porcentaje de monóxido de carbono en el gas.
- 8) disminución del pH.
- 9) aumento de la concentración de AGV no disociados.
- 10) inhibición parcial de las Bacterias metanogénicas por efecto de los AGV no disociados.
- 11) cierre del ciclo de inhibición-acumulación.
- 12) Cese de la metamogénesis.
- 13) Disminución de la alcalinidad.

14) Disminución posterior del pH.

15) Reactor ácido.

El fenómeno es muy gradual y permite su corrección: adición de neutralizantes o bicarbonato, reinoculación parcial del lodo.

Los AV pueden acumularse en los digestores por diversos motivos:

- a) sobrecarga orgánica: aumentos súbitos en la carga orgánica aplicada.
- b) a niveles sobrecarga hidráulica: aumentos repentinos en la velocidad de alimentación que arrastren a las bacterias metanogénicas.
- c) sobrecarga tóxica: aumentos repentinos en las concentraciones de compuestos potencialmente tóxicos.

La concentración de AV en el agua residual es indicador de desequilibrios en el sistema ya que en condiciones normales de operación, la concentración de AV en el efluente debe ser muy baja o inapreciable, la aparición de éstos en el efluente, o el incremento brusco de su concentración se debe considerar una señal de alarma.

Es importante considerar que la mayor parte de las reacciones bioquímicas son reversibles. La acetogénesis a partir de ácidos grasos de cadena larga produce elevada cantidad de hidrógeno. Cuando se produce un desequilibrio en la metanogénesis hidrogenoclastica, el aumento en la concentración de hidrógeno en el medio provoca el desplazamiento de la reacción en sentido inverso. Desde un punto de vista estrictamente fisiológico: La presencia conjunta de hidrógeno y de grandes concentraciones de AV de cadena corta (que aumentan la acidez del medio) promueven la polimerización de estos ácidos formándose AV de cadena larga: butírico, valérico y siguientes.

Nutrientes

Entre los requerimientos nutricionales también se encuentran elementos metálicos como son el hierro, níquel, cobalto, molibdeno, tungsteno, selenio, entre otros, los cuales son requeridos en cantidades pequeñas, por lo que se les denomina "micronutrientes". Estos elementos son indispensables para la actividad enzimática en los diversos procesos metabólicos de los microorganismos. Como las cantidades necesarias de estos elementos son trazas (Ver tabla9), muchos de ellos se pueden encontrar dentro de la misma agua residual, dependiendo de su procedencia.

Los micronutrientes son para los microorganismos como las vitaminas para nosotros, una deficiencia de alguno provocará una gradual reducción en la eficiencia del sistema que se notará a largo plazo (a diferencia de los macronutrientes cuya deficiencia se detecta rápidamente) y una vez causado el daño tardará algún tiempo en reponerse.

Tabla 14. Concentraciones de micronutrientes requeridos por los microorganismos anaerobios.

| Micronutriente | Concentración mg/L |
|----------------|-----------------------|
| K | 10.0 |
| Fe | 5.0 |
| Mg | 5.0 |
| Ca | 1.0 |
| Zn | 0.10 |
| cu, | 0.05 |
| Mn | 0.05 |
| Al | 0.05 |
| Ni | 0.05 |
| Se | 0.05 |
| Co | 0.01 |
| Mo | 0.001 |

Los procesos anaerobios presentan su mayor utilidad en los tratamientos de agua residual cuyo contenido de materia orgánica es elevado. En los últimos años se ha tenido un desarrollo potencial en el estudio de estos sistemas, debido al que presentan con respecto a otros tratamientos,

Los sistemas anaerobios ofrecen una diversidad de atractivos, A diferencia de los procesos aerobios, la tasa a la que se puede llevar a cabo el tratamiento no está limitada por la tasa a la que se pueda suministrar oxígeno. La dilución que es frecuentemente necesaria en los sistemas aerobios a fin de equilibrar la demanda de oxígeno con suministro del mismo resulta innecesaria y las aguas residuales de alta concentración se pueden tratar directamente. Además se ahorra el costo de la energía necesaria para la transferencia de oxígeno, y cuando se utiliza el metano generado, el proceso puede ser productor de energía neta. Las materias que no se ven afectadas por el tratamiento aerobio, tales como la celulosa, y las materias que son causa de problemas en los sistemas aerobios, como las materias grasas, son descompuestas por los procesos anaerobios. El rendimiento de la biomasa de los tratamientos anaerobios es también más bajo que en los sistemas aerobios, cerca de 0.1 a 0.4 kg de biomasa/kgDBO eliminada.

Sin embargo, como el proceso anaerobio es el más adecuado para el tratamiento de las aguas residuales de alta concentración, aún con alto porcentaje de descomposición, la concentración de nutrientes residuales seguirá siendo elevada, por tanto en muchas ocasiones se requerirá de un proceso de descomposición posterior del tipo aerobio.

IV. Tipos de reactores anaerobios

Tipos de reactores anaerobios

La cantidad de reactores utilizados industrialmente son muchos y cada uno tiene diferentes características, pero sus principios provienen de unos cuantos reactores básicos, que tienen como división inicial la forma en que la biomasa se desarrolla dentro de ellos, es decir, se tiene tres formas básicas: los procesos del lecho fijo, lecho suspendido o híbridos.

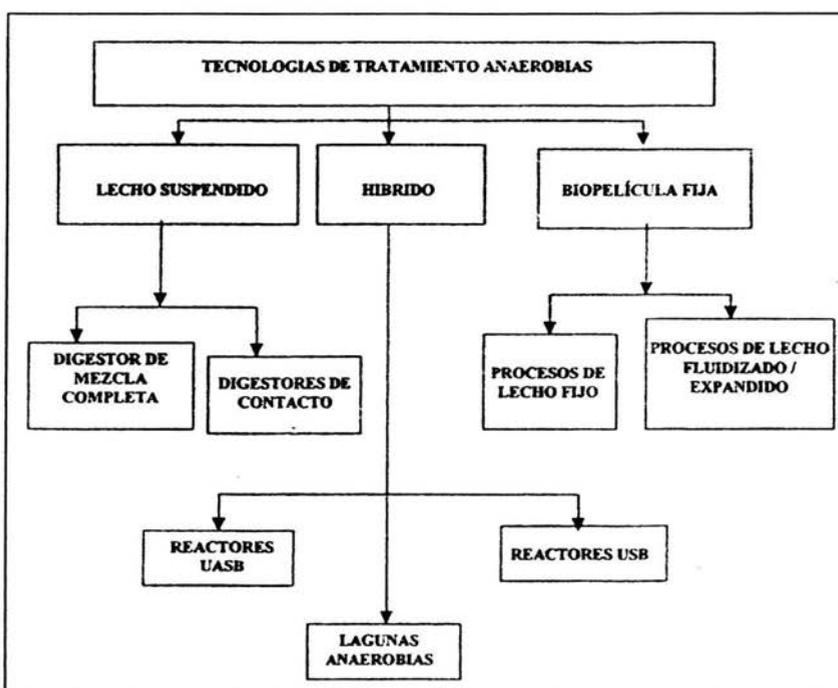


Figura 4. Procesos de tratamiento anaerobios comúnmente utilizados.

Tipo de reactores anaerobios

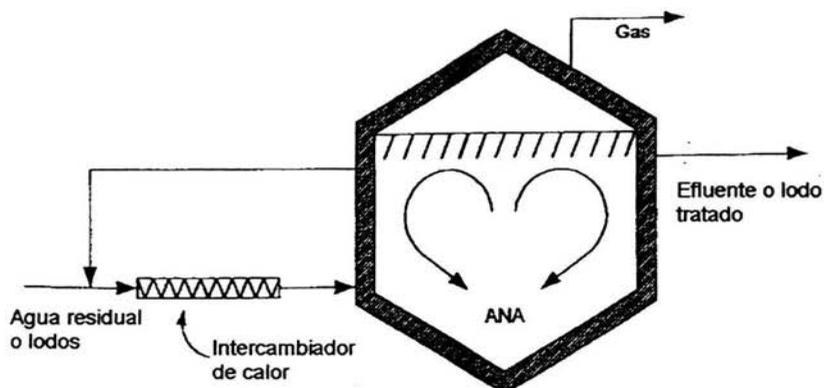


Figura 5. Principales componentes de un reactor: recipiente cerrado, sistemas de mezclado, de calentamiento y de separación gas-líquido.

Los reactores anaerobios más conocidos se diferencian principalmente atendiendo a la forma en que los microorganismos son retenidos en el interior del reactor. Los más conocidos son:

- Sistema de Contacto de fangos.
- Sistema de lecho suspendido o lecho de fangos.
- Sistema de lecho fijo o filtro
- Sistema de lecho fijo extendido y fluidizado.

Sistema de contacto de fangos

Existe una separación externa de los microorganismos y fango, que vuelven de nuevo al reactor por recirculación. (Especialmente indicado para el tratamiento de aguas residuales con elevada cantidad de sólidos lentamente digeribles y que sedimentan con facilidad).

La velocidad de carga suele ser de 1 a 6 Kg DQO/m³/día, con tiempo de residencia en el digestor superior a un día. Por este motivo, los reactores son voluminosos.

La ventaja de este sistema de *contacto* es la facilidad de poder separar las distintas fases del proceso, admitiendo la posibilidad de poder intercalar otros pasos tecnológicos.

También es de destacar su gran estabilidad.

Sistema de lecho fijo o filtro

Desarrollado muy recientemente, por lo que las realizaciones a escala industrial son relativamente escasas. El proceso biológico en este digestor lo realiza la biomasa metanogénica que está retenida en el interior del reactor, mediante la adhesión en forma de biopelícula en los intersticios de un soporte inerte, que rellena el digestor y a través del cual se hace pasar el agua residual a depurar.

Este relleno puede ser desordenado o canalizado: Reactor Anaerobio de Película Fina (RAPF), y desordenado: Filtro Anaerobio (FA).

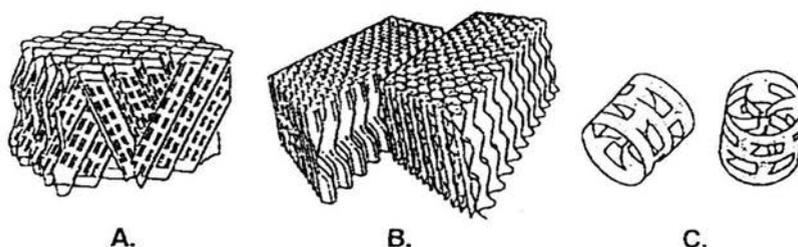


Figura 6. Soportes típicos en filtros anaerobios. A fujos cruzados; B tubular; C de anillo.

El primero opera comúnmente con flujo descendente, facilitando la transparencia de la materia el gas producido, al circular en contracorriente con el agua residual a depurar. El FA opera con flujo ascendente.

Por la constitución de estos digestores tiene una influencia primordial el RELLENO (tipo, material, etc) sobre el rendimiento del reactor. La etapa más difícil y lenta es la puesta en marcha del mismo. Las ventajas al elegir este tipo

de reactor son: la tolerancia que presenta frente a amplias variaciones de la carga orgánica aplicada (1-15 kgDQO/m³/día) y el relativo corto tiempo de residencia (de 1 a 3 días).

Digestión anaerobia en dos fases

En la digestión anaerobia de una fase se emplea únicamente un reactor, donde se efectúan simultáneamente: mezcla íntima del influente con todos los grupos de microorganismos, mediante bombeo, circulación o recirculación de fluidos; reacciones bioquímicas de la digestión y sus consecuencias de formación de distintos gases; espesamiento de fangos y formación del sobrenadante clarificado o efluente.

Al aplicar este proceso simple, a principios de los años setenta, a residuos sólidos suspendidos y aguas residuales con elevada carga orgánica de carbohidratos, lípidos y proteínas se observó frecuente inestabilidad global en la depuración, debido al desequilibrio entre la síntesis de los ácidos grasos volátiles (AGV) y degradación posterior. Por esta causa se planteó el tratamiento de este tipo de influente en dos fases o etapas.

El proceso de dos fases produce dos grupos de reacciones en dos digestores instalados en serie. Esta depuración requiere, por tanto, la colaboración de dos tipos o grupos distintos de microorganismos:

- Hidrolíticos y formadores de AGV, en el primer reactor.
- Acetogénicos y metanogénicos, en el segundo.

El éxito de este tratamiento comienza con una adecuada separación de estos dos grupos de bacterias, bien por diálisis, inhibición selectiva o por ajustes de velocidad de dilución, actuando con ello sobre el control cinético del crecimiento de las bacterias de dichos grupos. El progresivo afianzamiento de la separación se conseguirá a lo largo del funcionamiento, debido a la propia selección bacteriana que se realizará en cada uno de los reactores, con distintos medios trabajando con el Tiempo Hidráulico de Residencia (THR) adecuado.

Las ventajas que aporta este proceso de dos fases, comparándole con el de una sola, podemos resumir en:

- El primer reactor actuará de amortiguador a la llegada de algún golpe de carga del influente, aportando gran seguridad y estabilidad al sistema; también este reactor eliminará el oxígeno disuelto del influente, por lo que la eficacia en el segundo reactor será óptima.
- Permite conseguir un biogás de mayor riqueza en metano, lo que repercute en el balance económico.
- Puede conseguirse un aumento cinético de la hidrólisis por agitación en el primer reactor, y evitar la pérdida de microorganismos de esta primera etapa intercalando un decantador y bomba, para retornar éstos a su origen.

Resumiendo este sistema admite una mayor flexibilidad en variaciones de carga, pH y temperatura, a la vez que ofrece mayores facilidades en la actuación, seguimiento y control del proceso.

Sistema de lechos de fangos o lecho suspendido UASE

(Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

Esta tecnología se inició hace menos de diez años y se basa en la acumulación de microorganismos en un reactor, cuyas características de sedimentación impidan su arrastre fuera del mismo.

Los microorganismos se encuentran libres en el medio formando flocos. El gas generado tiende a subir a la parte superior del reactor, en donde se acumula (puede formar espuma), por lo que se requiere de algún sistema de control mecánico o hidráulico para evitar que el gas salga con el efluente. El exceso de lodo se puede eliminar en cualquier parte del reactor. Este sistema puede presentar problemas por la actividad de protozoarios.

Otras propiedades de este tipo de reactor son, un dispositivo de separación gas-líquido-sólido, por medio de campanas colectoras situadas en su parte alta, mediante la cual se consigue la sedimentación de los flocos de

pequeño tamaño que ascienden adheridos a las burbujas de gas y, el disponer de un sistema de introducción y distribución uniforme del influente (aguas de entrada), en la base del reactor.

Las concentraciones de biomasa van desde 60 g. de sólidos totales por litro, en el fondo, hasta 10 g/litro cerca de la salida.

En condiciones normales de trabajo actuando un solo digestor, el pH debe mantenerse en la zona de 6.5-7.8; la temperatura debe estar entre 38 y 40° C.

Debido a la gran concentración de lodos dentro del reactor, pueden conseguirse velocidades de carga orgánica de 5-30 kgDQO por m³ y día y tiempos de residencia entre 0.2-2 días. Esta última es la principal ventaja de este tipo de digestor, ya que con un poco volumen consigue una gran efectividad.

Híbridos

Los microorganismos son libres de acumularse en zonas sin empaque. En ausencia del medio, la concentración y el nivel de lodo en el reactor es fácilmente monitoreable y en los puntos de alimentación se mantienen mezclados. En otras zonas se cuenta con medios de soporte que proporcionan los beneficios de separación de fases de los sistemas de lechos fijos.

Reactores de película fija

Son equivalentes a los filtros rociadores aereobios ya que se coloca un medio sobre el que se desarrolla una película de microorganismos. El agua se alimenta la columna con flujo vertical, ya sea ascendente o descendente, poniéndose en contacto con los microorganismos adheridos al medio y con flóculos suspendidos que se encuentran entre los espacios vacíos. Esos reactores corresponden al modelo de flujo pistón y generalmente se operan con recirculación, la cual se utiliza para controlar el crecimiento la biomasa o en

caso necesario para controlar problemas por toxicidad o pH. El gas producido tiende a subir en forma de burbujas, el exceso de lodo se puede remover junto con el agua tratada, por lo se puede requerir un equipo para separarlo después.

Digestores de mezcla completa

Estos sistemas tienden a requerir grandes volúmenes de reactor y puede tener dificultades con mezclado, cuando se tiene altos sólidos suspendidos se debe mantener una agitación adecuada para evitar que se acumule material participado. Estos reactores tienen la desventaja de que la separación del gas producido complica la separación de los sólidos del agua y se requiere colocar equipo especial para resolver problemas como son desgasificadores o enfriadores.

Digestores de contacto

Es el equivalente del proceso de lodos activados de mezcla completa. La salida de un digestor de mezcla completa se asienta en condiciones anaerobias, y parte de los grupos alimentados regresan al digestor. Esto permite mantener un estrecho control sobre el tiempo de residencia de los lodos, de manera que los organismos metanogénicos se puedan retener en el sistema en un amplio rango de cargas hidráulicas y orgánicas. Se pueden originar problemas por el deficiente asentamiento de los lodos debido a la presencia de burbujas de gas en los lodos. Se ha determinado que el tiempo mínimo de residencia necesario mantener organismos metanogénicos en el sistema en condiciones óptimas es de 4 días a 35°C y que se tiene un valor crítico de 10 días, por lo que se requiere un tiempo de retención celular largo. Con este proceso se han alcanzado altas eficiencias de remoción para la DQO de hasta 95% utilizando cargas orgánicas inferiores a 0.35kgDQO/kgSSV d. Aunque económicamente su práctica se recomienda en agua residual con concentraciones en rangos de 1000 a 2000 mg DQO/L.

Reactores de lecho fluidizado o expandido

La diferencia entre un lecho expandido y un fluidizado se reduce a la velocidad de ascenso usada y al grado de medio de expansión mantenido. En los sistemas del lecho expandido el incremento del volumen del lecho está entre 15 y 30%, en un lecho fluidizado la velocidad utilizada produce de 25-300% de expansión. Los reactores del lecho fluidizado o expandido utilizan un medio inerte, como es el carbón activado y la arena para que se adhieran y desarrollen los microorganismos.

La expansión del lecho se controla por la velocidad vertical y el nivel de recirculación. El crecimiento de la biopelícula depende de la regeneración del lecho y por el tamaño y densidad del medio inerte en combinación con la velocidad vertical. Para el control del biogás generado se debe utilizar controles hidráulicos o mecánicos. El exceso de lodo se puede eliminar en la parte superior del lecho de fluidizado, donde la biomasa tiende a concentrarse más. Estos reactores, pueden presentar delicados problemas hidráulicos en el flujo de distribución del reactor.

Este tipo de reactor ha sido desarrollado al comprobar que las películas adheridas estáticas permiten una acumulación de biomasa por unidad de volumen de diez veces superior a las conseguidas en sistemas microbianos suspendidos.

Tomando lo anterior como base se llegó a este proceso, ya que con él se logra que los microorganismos se adhieran sobre pequeñas partículas inertes, con un flujo ascensorial con velocidad suficientemente elevada para provocar la expansión y fluidización del mismo, de forma que eliminen los peligros de oclusiones. Para conseguir estas velocidades de flujo es necesario recircular parte del *efluente*. En este tipo de lechos *fluidizados* la expansión puede llegar al 100%.

Factores muy importantes a tener en cuenta en este sistema son la elección del *soporte* para los microorganismos, así como el conseguir una buena distribución del fluido. En estos digestores, la mayor parte de la biomasa

(80-100%) se encuentra adherida, siendo muy pequeña la fracción de biomasa suspendida libremente.

Los resultados experimentales de este proceso aportan las desventajas de mayor coste de energía (recirculación) y las mejoras:

- Capacidad de tratamiento superior a 50 kgDQO/m³/día, con tiempos hidráulicos de residencia de menor de cinco horas.
- Seguridad en su trabajo, una vez logrado crecimiento estable de la biomasa.
- Se reactiva fácilmente después de paradas frecuentes, aunque éstas sean largas

Reactores de lecho fijos

Los procesos de lecho fijo manejan una alta concentración de biomasa y un tiempo de retención celular elevado debido a concentración de organismos los volúmenes de reactor son pequeños con rangos de alta carga orgánica. Su operación es relativamente estable bajo condiciones de alimentación variable, no requieren de mezclado mecánico, la formación de biogás y la recirculación del efluente proporcionan normalmente una concentración de sustrato, un pH. y una temperatura uniformes en el reactor. Este tipo de sistema es recomendable para agua residual con concentración de sólidos suspendidos baja, de que tienen efectos de acumulación.

Reactor de manto de lodos (UASB)

En este reactor los microorganismos se encuentran en suspensión gracias al biogás generado. Para evitar una mezcla mecánica, el agua debe ser eventualmente distribuida el fondo del reactor (generalmente se utilizan tuberías). Los flóculos forman granulos de 1 a 5 mm de diámetro. En la parte baja del reactor se forma una densa capa de lodo granular. Esto resulta en una concentración del lodo con considerables variaciones al largo del reactor.

Laguna anaerobia

Es un proceso de tratamiento anaerobia de bajo rango (menor a uno o dos kgDQO/m³d), el cual ha tenido un amplio desarrollo tecnológico. El sistema puede ser construido en forma rectangular, excavando o en un tanque cuando es poca la tierra disponible. Los sistemas de laguna son procesos relativamente económicos y recomendables para aguas residuales con alto contenido de sólidos suspendidos o cantidades significativas de aceite y grasa.

Tipos de reactores aplicados en México

Hasta 1998, se habían construido en México 85 plantas de tratamiento de agua residual anaerobias, utilizando 6 diferentes tipos de reactores:

- Filtros anaerobios de flujo ascendente.
- Híbridos.
- De baja carga.
- Modificación china.
- Reactores de lecho de lodos granular expandido (EGSB).
- Reactores UASB.

Tabla 15. Tipos de reactores aplicados en México.

| Tipo de reactor | Filtro ascendente | Híbrido | De baja carga* | Modificación china. | egsb | uasb |
|--|-------------------|---------|----------------|---------------------|------|------|
| % del número total de reactores | 4.76 | 16.5 | 1.18 | 1.18 | 2.35 | 71.8 |
| %del total del volumen | 0.34 | 1.75 | 0.01 | 0.01 | 1.06 | 73.8 |
| %construidos por compañías nacionales, | 75 | 100 | 100 | 100 | 100 | 70.5 |
| %de reactores tratando | | | | | | |
| agua industrial | 50 | 93 | 100 | 100 | 100 | 49 |
| agua doméstica | 50 | 7 | 0 | 0 | 0 | 51 |

*incluye de digestores anaerobios y lagunas.

Fuente: Monroy, 2000.

El dominio tecnológico le corresponde por mucho a los reactores UASB considerando tanto el número como el volumen de reactores (independientemente de la tecnología de origen). Este es, probablemente, el resultado de la construcción simple y el bajo costo asociado a la ausencia de material de empaque.

FILTRO ANAEROBIO

El proceso de tratamiento anaerobio de cultivo fijo más utilizado es el filtro anaerobio, que se aplica en aguas municipales e industriales. El filtro anaerobio es un sistema relativamente nuevo que consiste en la alimentación del agua residual a tratar a una columna que en el interior contiene algún tipo de empaque, el cual está impregnado de una película de microorganismos anaerobios, el agua residual pasa a través de ese material y entran en contacto con las bacterias que se encargan de eliminar la materia orgánica contenida. Como las bacterias están adheridas al sistema el efluente no arrastra biomasa fuera del sistema; por lo que se alcanzan tiempos de retención celular muy alta con tiempos de retención hidráulica bajos. El sistema es capaz de tratar residuos o desechos a una elevada carga hidráulica sin tener que recircular.

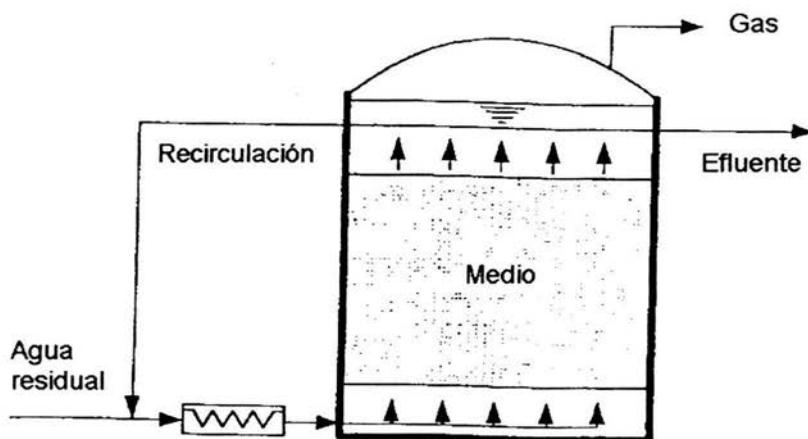


Figura 7. Filtro anaerobio.

En los reactores empacados con flujo ascendente una proporción de la biomasa contenida no es retenida en el medio de empaque. Este material no unido es sujetado en las intersecciones entre las partículas del medio y a través de la influencia del contacto físico con el medio. Estos microorganismos contribuyen significativamente en el tratamiento del agua residual en un sistema de lecho empacado de flujo ascendente, por este motivo usualmente se mantienen velocidades de ascenso relativamente bajas, evitando el arrastre de la biomasa.

Para optimizar la acumulación de la biomasa no unida, se han desarrollado reactores con nuevos medios de empaque sintéticos, sustituyendo a los que utilizaban rocas como medio. El promedio de los empaques sintéticos son estructuras abiertas con un alto volumen vacío (95%), aumentando el volumen disponible dentro de los reactores. Se han hecho numerosos estudios con diversos tipos de empaques ocupando diferentes materiales y formas y aún no se cuenta con un medio perfecto para su utilización en los reactores anaerobios empacados. La aplicación de un tipo específico se definirá por una relación entre factores económicos y de operación. La relación superficie / volumen de los empaques para filtros del lecho fijo más comúnmente usada es relativamente bajas ($100 \text{ m}^2/\text{m}^3$).

Los procesos de tratamiento anaerobio del lecho fijo son aplicados principalmente para agua residuales con baja ($< 1000 \text{ mgDQO/l}$) o intermedia concentración ($> 20,000 \text{ mg DQO/l}$). para su utilización en procesos con una alta carga orgánica se recomienda la recirculación del efluente para mantener una concentración de DQO inicial entre 8000 y $12,000 \text{ mg DQO/l}$. un tanque de igualación puede ser necesario para compensar los bajos tiempos de retención utilizados en los procesos de lecho empacado. Este proceso puede alcanzar altos rangos de remoción (del 90% a 98%).

Existen dos tipos de reactores de película fija: verticales y horizontales, de los cuales los más comunes son los verticales. Estos se pueden operar de forma ascendente o descendente.

Los reactores de flujo ascendentes tienen la desventaja de ser susceptibles a obstruirse y a cortos circuitos sobretodo cuando hay una alta concentración de sólidos suspendidos, por lo que en la operación puede requerirse de una recirculación para diluir residuos concentrados, así como para evitar que el pH baje en la entrada y dañe a microorganismos en el fondo del reactor. Los reactores de alimentación descendente tienen menor posibilidad de obstruirse, porque su biomasa se encuentra mejor distribuida y adherida al medio, además da una *mejor* distribución del flujo.

En general, los procesos de lecho fijo son estables y provistos de una operación sencilla. La gran proporción de microorganismos en los filtros anaerobios aumenta la retención de biomasa y promueve la estabilidad del proceso bajo variables condiciones de operación. En la tabla se mencionan algunas de las características de los reactores de lecho fijo.

Tabla16. Características de un reactor de lecho fijo

| Características de un reactor de lecho fijo | |
|---|----------------------------------|
| Importancia de la estructura de la biopelícula | Parcialmente |
| Control del espesor de la biopelícula en el reactor | No |
| Importancia de la biopelícula no unida al medio | No |
| Recirculación necesaria | Parcialmente (se puede requerir) |
| Mezclado necesario | No |
| Necesaria separación del equipo | No |
| Posible separación de fases (2 tanques con las fases de gas y ácido separados) | Parcialmente (se puede requerir) |
| Adecuado para desechos con orgánicos suspendidos | Parcialmente |
| Tolerancia hacia sobrecargas hidráulicas | Si |
| Tolerancia hacia sobrecargas orgánica; | Si |
| Adecuado para altas concentraciones de compuestos o sustancias tóxicas biodegradables | Si (se requiere recirculación) |
| Susceptibilidad a choques por dosis de compuestos o sustancias tóxicas. | parcialmente |
| Problemas para arrancar | parcialmente |
| Facilidad para re-arrancar | Si |

Usos de filtros anaerobios

Entre los procesos biológicos del tipo anaerobio, están los filtros anaerobios, que son reactores que utilizan una película fija a un medio inerte y que aprovecha el desarrollo de una alta concentración de biomasa, requerida para el tratamiento eficiente del agua residual.

Ventajas del filtro anaerobios:

- Alta eficiencia de remoción en aguas residuales ricas en materia orgánica biodegradable en tiempos de retención hidráulicos relativamente cortos.
- Puede alcanzar tiempos de retención celular altos (100 horas), permitiendo el crecimiento de bacterias metanogénicas.
- No requiere recircular lodos, (casi todo se mantiene dentro del sistema).
- El efluente sale casi libre de lodo.
- Altas eficiencias sin introducir una mayor temperatura al proceso.
- Se emplean para tratar aguas residuales con alta carga o diluidas.
- Se producen muy bajos volúmenes de lodos residuales.
- Los lodos que produce se encuentran estabilizados.

Los reactores de lecho fijo anaerobios han sido estudiados y utilizados ampliamente. En México, se cuenta con dos sistemas de tratamiento de filtros anaerobios en el ámbito industrial: uno es Bola de Oro en Coatepec, Veracruz (Industria cafetalera), con capacidad de 22.5 m³/d y 5000 mgDQO/L, presenta una eficiencia promedio del 97% de DBO₅, y el otro es beneficio "Roma" en Emiliano Zapata Ver, el cual tiene una capacidad de 57 m³/d y 4000-7000 mgDBO/L, con una *eficiencia de diseño mayor al 90%*.

En Alemania, hasta 1996, existían 30 plantas que trabajaban con reactores de película fija, representando el 28% en número de reactores anaerobios existentes, los cuales son utilizados para diferentes tipos de agua residual, siendo las más usuales las industrias para procesar carne, alcohol, papel y cervecerías (ver tabla 17).

Tabla 17. Reactores de película fija en Alemania hasta 1997.

| Industria | # de reactores de película fija |
|------------------------------------|--|
| Papel | 2 |
| Alcohol | 5 |
| Carne | 9 |
| Celulosa | 1 |
| Cervecerías | 4 |
| Almidón | 3 |
| Procesamiento de tomate | 1 |
| Vegetales y frutas | 1 |
| Embotelladores de refrescos | 2 |
| otros | 1 |
| total | 30 |

DISEÑO DE REACTORES

El proceso de reactor básico (mezcla completa sin lecho) se muestra en la Figura 8. El sistema convencional de baja carga mostrado se estratifica en varias capas. El fango de aportación entra al tanque cerca de su parte superior a la altura de la capa sobrenadante (una capa líquida parcialmente purificada). Por debajo se encuentra la capa digestora activa de fangos y en la capa inferior del tanque se asienta el fango estabilizado, listo para su extracción. Estos digestores convencionales o de baja carga se caracterizan porque sufren agitaciones intermitentes, con aportes y extracciones de fango asimismo intermitentes. Cuando no se realiza agitación el contenido del digestor se estratifica tal y como se muestra en la Figura 8(a).

Los digestores de alta carga se caracterizan por una agitación continua, excepto en las extracciones de fangos. Los digestores de alta carga poseen unos tiempos de retención hidráulica alrededor de la mitad que los de baja carga y su tasa de producción de gas casi dobla la de éstos. En las siguientes figuras se detallan las numerosas variaciones existentes en este proceso, incluyendo recirculación del gas, el lecho fijo o lecho fluidizado, etc.

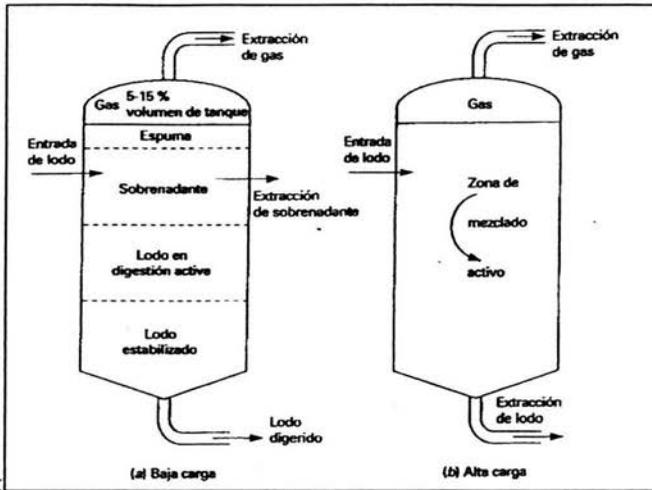


Figura 8. Diseños de reactores de primera generación.

Los reactores se pueden clasificar en:

1. Reactores de 1ª generación, donde el tiempo de retención hidráulico es igual al tiempo de retención de sólidos, o lo que es lo mismo $\Phi = \Phi_c$, (que se define a continuación). Tal y como se muestra en la Figura 3, incluyen:
 - a) Digestor por lotes o discontinuo.
 - b) Digestor de flujo de pistón.
 - c) Reactor continuo de mezcla completa RMC.
 - d) Reactor anaerobio de contacto.

2. Los reactores de 2ª generación, en los que el tiempo de retención de sólidos es mayor que el tiempo de retención hidráulico, quiere decir que $\Phi_c > \Phi$. Tal y como se muestra en la Figura 4, en este tipo se incluyen:
 - a) Filtro anaerobio de flujo ascendente-descendente.
 - b) Reactores de lecho fijo con flujo descendente en régimen estacionario.
 - c) Reactores de lecho fluidizado.
 - d) Reactores anaerobios de flujo ascendente con lecho de lodos.
 - e) Reactores anaerobios híbridos de lodos.

Para las diversas configuraciones de reactores existen distintos usos tanto para residuos urbanos, industriales como agrícolas. Para los residuos agrícolas se emplea normalmente un proceso discontinuo o por lotes mientras que en la industria la tendencia gira a reactores con lechos fluidizados o fijos. La mayoría de los residuos tratados por los digestores son líquidos con un contenido en sólidos entre 2-6%. Más recientemente, se están empleando digestores de alto contenido en sólidos, particularmente para RSU, donde el contenido de sólidos se encuentra entre 20-30%. Los tiempos de retención de sólidos se encuentran típicamente entre 10 y 30 días siendo éste un parámetro fundamental en el diseño

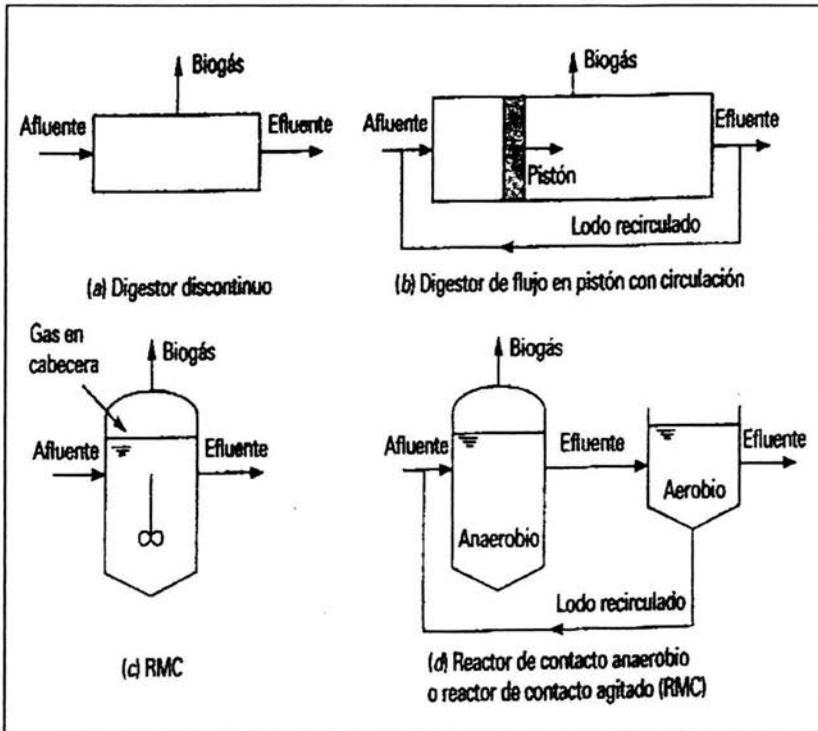


Figura 9. Reactores de primera generación.

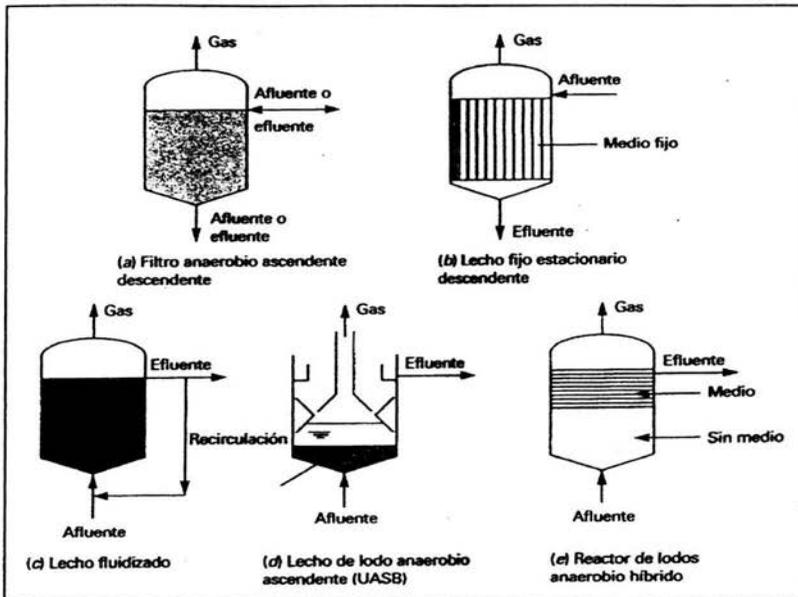


Figura 10. Diseños de reactores de segunda generación.

En los reactores sometidos a agitación, ésta se realiza por alguno de los métodos siguientes:

- Mezcladores mecánicos.
- Recirculación del gas
- Recirculación de los fangos

Los digestores pueden operar a las siguientes temperaturas:

- Psicrófilos (0-20 °C)
- Mesófilos (≈36 °C)
- Termófilos (50-60 °C)

Los digestores más antiguos operaban a temperatura ambiente con mayores tiempos de retención. La mayoría de los digestores operan hoy día a temperaturas mesófilas con buenos resultados de estabilidad y producción de gas (alrededor de 2 m³ biogás/m³ de digestor). Nótese que el biogás = CH₄ + CO₂ con un contenido típico en CH₄ del 60%. La temperatura óptima de trabajo

es la termófila ya que se alcanza la máxima tasa de producción de gas y se garantiza la destrucción de patógenos. Sin embargo, a esta temperatura el proceso es el menos estable y necesita una supervisión de proceso más compleja. La producción de gas depende del diseño, temperatura de operación, tipo de residuo, etc., aunque típicamente este valor oscila entre 1 y 5 m³ de biogás por m³ de volumen del digestor. Los márgenes de reducción de la DQO se encuentran entre el 70-90%. Las cargas definidas en kg DQO/m³/día están entre 2 y 40. La composición típica en metano del biogás es del 50-70%.

Diseño del proceso

El diseño de proceso implica a varios parámetros entre los que se incluyen:

- Tiempo de retención de sólidos (TRS), días
- Tiempo de retención hidráulico (TRH), días
- Carga de sólidos volátiles, kg SV/m³/día
- Tasa de producción de sólidos, kg SS/m³/día
- Tasa de producción de gas, m³ CH₄/m³ reactor/día
- Configuración del tanque
- Sistemas de agitación
- Sistemas de calefacción

Los datos típicos de diseño y operación para procesos de digestión anaerobia en Estados Unidos según recopilación de ASCE, se muestran en la Tabla 18. Es notable que la temperatura de operación predominante es la mesófila (38°C). Esto también es así en Europa. Desde 1983, la tecnología de digestión anaerobia ha mejorado significativamente. Numerosas plantas de nueva construcción operan hoy día en condiciones mesófilas con el objetivo de obtener mayores tasas de producción de gas aun con alto contenido en sólidos. Con sistemas de digestión sin recirculación, el tiempo de retención de sólidos es igual el tiempo de retención hidráulico. Se mantienen tiempos de residencia de fangos adecuados con el objetivo de reducir completamente los sólidos volátiles. El tiempo de retención de sólidos y el tiempo de retención hidráulico se define como:

$$\text{TRH} = \frac{\text{volumen de trabajo, l}}{\text{tasa de eliminación de fango, l/día}} \quad (16)$$

$$\text{TRS} = \frac{\text{masa de sólidos en el tanque, kg}}{\text{tasa de eliminación de sólidos, kg/día}}$$

$$\text{TRH} = \frac{\text{volumen de trabajo, l}}{\text{tasa de eliminación de fango, l/d}}$$

Tabla 18. Datos de diseño y operación de digestores anaerobios.

| Variable | Media de respuestas |
|--|---------------------|
| Tipo de fango de aporte Primario (%) | 50 |
| Filtro percolador (%) | 15 |
| Fango activado en exceso (%) | 35 |
| Sólidos totales (%) | 4,7 |
| Sólidos volátiles (%) | 62 |
| Diámetro del tanque (m) | 12-38 m |
| Altura del tanque (m) | 5-19 |
| Carga de fango (kg SSV/m ³ /día) | ≈5,5 |
| Producción de gas (m ³ /kg SV reducido) | ≈1 |
| Metano (%) | 65 |
| Temperatura de operación (°C) | 38 |

Adaptado de ASCE, 1983.

Típicamente, los fangos de aguas residuales urbanas necesitan un TRS no inferior a 10 días. Esto es debido a que la etapa microbiológica que limita el proceso es la etapa de crecimiento metanogénica de las bacterias, que necesita alrededor de 10 días: Para lodos mixtos se suelen emplear tiempos mayores, ya sean urbanos, industriales o agrícolas. Los márgenes de trabajo suelen ser de entre 15 y 30 días.

La carga de sólidos volátiles se define como:

$$\text{carga de SV} = \frac{\text{sólidos volátiles añadidos diariamente, kgSV/d}}{\text{volumen de trabajo del digestor, m}^3} \quad (17)$$

Los valores típicos están entre 2-3 kg SV/m³/d. Los valores de diseño pueden llegar a un máximo de 3.2, debido a que la toxicidad tanto del amoníaco como de los metales pueden limitar la operación. Las tasas de producción de gas se encuentran entre 0.5-1.5 m³ de gas por kg de SV eliminado. Estas tasas dependerán en la temperatura del digestor siendo ésta mayor cuando se alcancen condiciones teiniófilas. Hoy en día se eligen geometrías de tanque principalmente cilíndricas con diámetros entre 5-50 m y alturas entre 3-25 m. Algunos digestores poseen un diámetro mayor que su altura (como por ejemplo las unidades de lecho fluidizado), mientras que los que emplean la recirculación de gas como mecanismo de agitación pueden ser más altos que su diámetro. La construcción del tanque hoy en día se realiza casi siempre en acero. Los sistemas de agitación y calefacción pueden ser interdependientes. Todas las configuraciones de reactor tienen un aislamiento térmico. Entre los mecanismos de calefacción se incluyen bolsas exteriores de agua, tuberías exteriores aisladas, cambiadores de calor interiores, inyección de vapor o calefacción directa por llama. Por ejemplo el calor necesario para elevar la temperatura del fango desde la temperatura ambiental de aporte, hasta condiciones mesófilas (38°C) y mantenerlo a esa temperatura se calcula sencillamente con la expresión:

$$H = WCAT + UAAT \quad (18)$$

donde H = calor necesario en el fango afluyente compensado por las pérdidas,
kg cal/h

W = caudal de fango afluyente, kg/h

AT = diferencia entre la temperatura del digestor y la temperatura del lodo afluyente

U = coeficiente de transferencia de calor a través de las paredes del tanque, kg cal/ m² h °C

A = área superficial del digestor por la que se producen pérdidas de calor

C = capacidad térmica específica media del fango de aporte, aproximadamente 1 kg cal/kg °C

La agitación en el digestor se considera esencial para mantener una calidad de fango uniforme a efectos de prevenir bloqueo de las canalizaciones de entrada y las de salida de fango y gas. El mecanismo más simple de agitación fue la reintroducción de gas al propio tanque. Sin embargo, este sistema es antieconómico y en la actualidad se emplean directamente sistemas mecánicos. El método más común es el de recirculación por bombeo cuya línea de impulsión consiste en un tubo montado en el interior del tanque.

El volumen de digestor discontinuo viene dado como:

$$VS = (V_i - 2/3(V_f - V_i))t \quad (19)$$

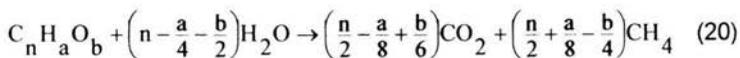
Donde V_S = volumen del digestor

V_i = volumen inicial de fango V_f = volumen final de fango

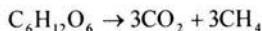
t = tiempo de retención

PRODUCCIÓN DE METANO

La cantidad de metano producida dependerá de varios parámetros, pero más concretamente del tipo de residuo, tipo de reactor, temperatura y contenido de sólidos. La ecuación estequiométrica para la producción de metano era



Por ejemplo, si se usa glucosa pura, entonces:



(peso mol=180) (peso mol=44) (peso mol=16)

Es decir que 1 kg de glucosa produce $3 \times 16/180 = 0,27 \text{ m}^3$ de CH_4 .

Igualmente, 1 kg de hidratos de carbono produce alrededor de $0,35 \text{ m}^3$ de CH_4 .

Para reactores continuos de mezcla completa la tasa de producción de metano es:

$$M_{\text{CH}_4} = 0,35(nQC_i - 1,42r_gV) \quad (21)$$

Donde n = fracción de DQO biodegradable convertida ($\sim 0,85$) Q = caudal m^3/s

C_i = carga de DQO, $\text{kg}/1$

r_a = tasas de crecimiento, $\text{g}/\text{m}^3\text{s}$

V = volumen, m^3

M_{CH_4} = producción de metano, m^3/s

Como estimación preliminar de la producción de gas, si se ignora la tasa de crecimiento, entonces

$$M_{\text{CH}_4} = 0,3QC_i \text{ eq. 9}$$

APLICACIONES DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Las aplicaciones de la digestión anaerobia se pueden clasificar de forma amplia en:

- Agrícolas
- Industriales
- Urbanas

El tratamiento de residuos agrícolas

El uso de D/A para tratar residuos agrícolas es probablemente el proceso unitario que más ha contribuido a la reducción de la contaminación agrícola. El ganado vacuno produce diariamente unos residuos de excrementos entre 10-40 kg /animal con unos rangos de contenidos en sólidos entre 10 y 14%. Los residuos del ganado porcino se generan a unas tasas entre 5-15 kg/animal con unos contenidos en sólidos entre 5 y 10%. Estos residuos frecuentemente se diluyen con escorrentias de lluvia, etc. La composición química de los residuos de animales es similar a un fango de decantación

primaria de una depuradora con unos valores más altos en fibra. Existen tres tipos de digestores que se han usado con este propósito:

- Discontinuos
- Reactores continuos de mezcla completa
- Digestores de 2ª. generación - Lechos fijos o fluidizados - Lechos de fango - Digestores de contacto

El reactor continuo de mezcla completa es el digestor mas comúnmente empleado en aplicaciones agrícolas cuando el afluente está continuamente disponible y existe una demanda correspondiente de la producción de gas. En un reactor continuo de mezcla completa los sólidos y líquidos tienen el mismo tiempo de retención debido a que se encuentran bien agitados oscilando el tiempo entre 12 y 30 días. Generalmente, las bacterias metanogénicas poseen un tiempo de duplicación de 9 días y esto supone una restricción en cuanto a tiempo se refiere. Típicamente a los residuos de ganado vacuno o porcino se les puede eliminar las partículas sólidas mayores y algunas veces se diluyen desde valores de 5-15 % a 1-2%. Con estos últimos valores el residuo se puede tratar en un digestor de bajo contenido en sólidos. Las temperaturas de operación más comunes son de unos 36°C aunque recientemente se están empleando rangos termófilos. Con estas temperaturas se consigue una producción de gas superior y un producto final libre de patógenos. Sin embargo, el proceso es más inestable y por ende requiere un mayor control.

El tratamiento de residuos industriales

La digestión anaerobia no sólo se usa ampliamente en la industria alimenticia sino también en la industria química, farmacéutica y papelera. Cuando una industria utiliza procesos continuos puede tener aplicación la D/A. Sin embargo, algunas industrias, particularmente algunas industrias químicas, trabajan de manera discontinua, variando el producto químico y de esta manera la composición y el carácter del residuo. En estos casos la D/A puede no ser apropiada. El reactor continuo de mezcla completa (RMC) es bastante «popular» en la industria, y aún más en la industria agraria. Normalmente el

residuo se pretrata eliminándose los sólidos y aceites u otros agentes potencialmente inhibidores. Los tiempos de retención típicos se encuentran entre los 3 y 12 días con carga orgánica entre 1 y 5 kg DQO/m³/día.

El filtro anaerobio se viene usando más en años recientes donde el relleno consiste en un material sintético ligero (por ejemplo, PVC Flocor). Este material posee gran área superficial y espacio hueco. Rápidamente se fluidiza y así se puede limpiar mediante flujo descendente (retrolavado).

El tratamiento de los residuos urbanos

Con respecto a la digestión anaerobia, los residuos urbanos se clasifican en tres categorías:

- Aguas residuales.
- Fangos de aguas residuales.
- Residuos sólidos urbanos.

Los seres humanos producen alrededor de 0.5 kg de heces y 1.2 kg de orina diariamente. Los excrementos son complejos y poseen una composición variable, tanto física, química, como orgánicamente. Es ≈70% vlátil, ≈35% celulosa, ≈6 % hemicelulosa, ≈19 % proteína bruta, ≈14 % lípidos, ≈34 % ceniza y una relación C/N ≈4 a 5. Las aguas residuales pueden digerirse en las tres condiciones de temperaturas, tanto psicrófilas, mesófilas como termófilas. A temperaturas psicrófilas el tiempo de retención necesario es ~55 días para la eliminación de patógenos. Se suele emplear la digestión anaerobia de aguas residuales para casas unifamiliares o residencias de vacaciones (fosas sépticas) pero no se ha empleado para edificaciones mayores. Cuando se han empleado, el reactor tipo ha sido el UASB * o el UASB híbrido, en un modelo a escala de laboratorio, empleó un UASB híbrido para tratar únicamente agua residual bruta a temperatura ambiente. El proceso se mantuvo estable y produjo gas a razón de 1 m³/m³ de reactor por día. La reducción de SS y DQO fue de 60-80 %. El proceso UASB o sus híbridos se encuentran en pequeñas instalaciones en Brasil donde las temperaturas ambientales diarias son cercanas a las mesófilas.

Los biosólidos

Son el producto final semisólido de la depuración del agua residual. La mayoría de las aguas residuales tratadas son urbanas o industriales. El fango procedente de aguas residuales urbanas se denomina biosólido, producidos por la industria también se denominan biosólidos si su origen es orgánico. Los fangos químicos no pueden definirse como biosólidos. Los fangos de una depuradora, incluso teniendo naturaleza química, son considerados como biosólidos. A nivel mundial existen expectativas de crecimiento del volumen de biosólidos ($\approx 50\%$) como resultado de buen número de proyectos recientes en el área ambiental.

Problemática del vertido de biosólidos

Tradicionalmente muchos países con centros urbanos costeros como Australia, vertían la mayor parte de sus fangos al mar. Por ejemplo, hasta 1993, Sidney vertía el 60% de sus fangos al mar, 10% se empleaba en agricultura y 30% se convertía en composta. En Nueva York donde la solución consistió en el vertido de la casi totalidad de los fangos, se prohibió su vertido en 1988, lo que forzó a las autoridades a adoptar nuevas políticas e interrumpir el vertido al mar en 1992. Hoy día se trabaja con soluciones de tres vías entre las que se incluyen el secado térmico, restauración de terrenos (en Texas) y el uso de vertederos únicamente habilitados para fangos. En Los Ángeles también se ha frenado el vertido al mar debido a la construcción de su enorme planta depuradora de Hyperion ($Q = 1,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{día}$). La planta está dotada de procesos de digestión anaerobia, secado de fangos por centrifugado, deshidratación de fangos y combustión. El problema del vertido de los fangos es a nivel mundial. Incluso en Irlanda, que frenó el vertido de fangos al mar en 1990, se han adoptado múltiples opciones para el vertido, entre las que se incluye la inyección o la aplicación al terreno, aplicaciones en silvicultura, vertederos únicamente destinados a fangos, digestión anaerobia. Algunos países se embarcaron en la búsqueda de tecnologías de compostaje pero se encontraron con la disconformidad surgida en la opinión pública debido a la presencia de metales pesados, contaminación microbiológica y malos olores.

RUTAS DE PROCESADO PARA BIOSÓLIDOS

La Figura 10 es un diagrama de flujo de las posibles rutas para tratamiento de biosólidos. En una planta depuradora de aguas residuales urbanas de calidad de tratamiento secundario (o mejor), se producen lodos primarios y secundarios. Los lodos primarios consisten en sólidos orgánicos e inorgánicos que sedimentaron, sin ayuda, en un decantador primario con un tiempo de retención de alrededor de 1 hora. Los lodos secundarios son menos densos, con tamaños de partícula menores que los lodos primarios. Los lodos primarios se suelen espesar por medios físicos.

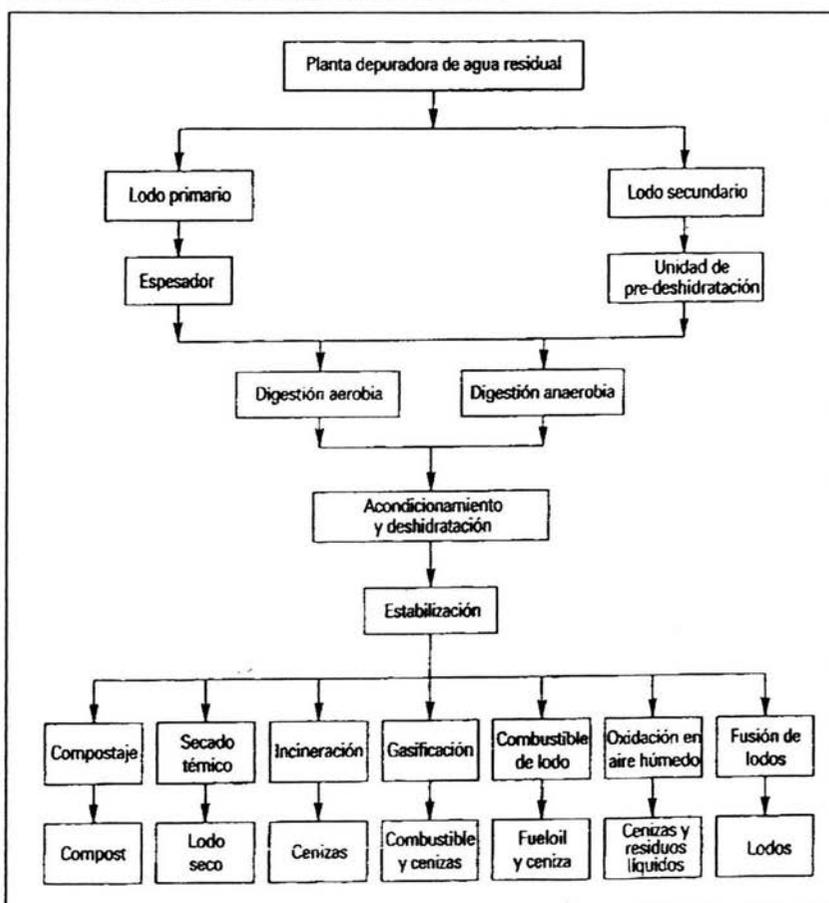


Figura 11. Posibles rutas para tratamiento de biosólidos.

V. CASOS DE APLICACIÓN

CASOS DE APLICACIÓN

Tratamiento anaerobio-aerobio de las aguas residuales de las instalaciones del IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas)

Planta de tratamiento de aguas residuales IIE

Originalmente la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del IIE era una planta de lodos activados (desarrollo aerobio), proceso que consumía mucha energía y generaba lodos residuales de cinco a seis veces más que los procesos anaerobios.

El soplador de la planta que proporciona el aire requerido por los lodos activados, está acoplado a un motor de 10 hp que opera continuamente las 24 horas del día; actualmente opera en forma intermitente (sólo durante el día). Aun así se consume el 30% de la energía.

Incorporando un tratamiento anaerobio inicial a esta planta, dicho gasto se pudo reducir a un 30% o 40% del 30% citado. Para lograr lo anterior fue necesario efectuar ligeras modificaciones a la planta ya existente, sin alterarla significativamente ni poner en riesgo la calidad del agua tratada.

El objetivo de las modificaciones efectuadas a la planta fue para tratar, inicialmente por medio de un proceso anaerobio, las aguas residuales del IIE y depurarlas con el proceso aerobio ya existente.

Los beneficios esperados de estas modificaciones fueron ahorrar energía y generar menor cantidad de lodos residuales, así como contar con una planta en el nivel demostrativo de tales características.

Modificación de la planta

Tomando en consideración el volumen y la calidad del agua, así como la ingeniería básica para la construcción de un reactor anaerobio de manto de lodos y flujo ascendente (UASB), se modificó la planta de tratamiento de aguas del IIE.

La modificación efectuada en la planta consistió en construir un tanque de 7 x 1 x 3.6 metros, dando un volumen aproximado de 25 m³ para crear un compartimiento separado del proceso aerobio; en este tanque se instaló un captador de gas de fibra de vidrio, una caja reguladora de flujo y tubos de distribución de la alimentación del agua en el fondo del compartimiento. En la parte superior se instaló un colector de agua tratada, el cual desemboca en el tanque de aireación junto con los lodos de retorno del proceso aerobio (fig. 12)

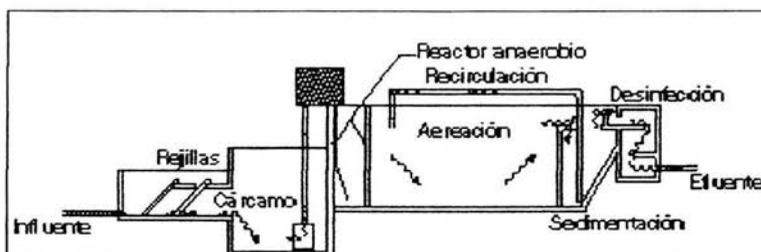


Figura 12. Diagrama de flujo de la planta modificada tratadora de aguas residuales del IIE.

Experimentación en laboratorio

Con el propósito de anticipar el comportamiento del proceso, en el laboratorio se inició la experimentación.

La operación de este reactor se inició en marzo de 1993, la eficiencia en remoción de DQO después de seis meses de operación oscila entre el 65 y el 75%, a tiempos de residencia de 3.2 a 5 horas.

Resultados obtenidos

Una vez efectuadas las modificaciones, la planta anaerobia se inoculó con 2 m³ de lodos activados digeridos y se inició el llenado del reactor con agua residual, dejando reposar estos lodos durante dos semanas. A continuación se inició la alimentación en forma continua a razón de 10 m³/d en promedio, dando por resultado un tiempo hidráulico de resistencia de 60 horas. Estas condiciones se mantuvieron por espacio de dos meses alcanzando en este tiempo, remociones de DQO del 60%. La planta está recibiendo desde mediados de 1993, los 65 m³/d promedio de aguas residuales, dando por resultado un tiempo de residencia de nueve horas en promedio.

Perspectivas de operación

Tanto los ensayos de laboratorio como la operación de la planta muestran claramente los beneficios de tratar por medios anaerobios estas aguas residuales, ya que alcanzan en el laboratorio depuraciones del orden del 75% en términos de DQO a tiempos de residencia de 3.2 a 5 horas y temperatura ambiente. La operación del reactor anaerobio instalado en la planta de tratamiento de aguas residuales del IIE ha permitido constatar los resultados de laboratorio y las dificultades de escala de estos sistemas, permitiendo corregir y optimizar su funcionamiento.

La combinación de los procesos anaerobios y aerobios para el tratamiento de aguas residuales del tipo municipal tiene gran oportunidad de ser empleada a gran escala, ya que el gran consumo de energía y producción de lodos residuales resultantes de los procesos aerobios empleados tradicionalmente, pueden reducirse de 60-70%, teniendo gran impacto sobre todo en un marco de preservación ecológica y energética como los que deben imperar en este tiempo; con esta combinación de procesos anaerobio/aerobio se tiene gran ventaja económica de su aplicación en el tratamiento de aguas residuales municipales, cuyo mercado potencial en nuestro país se estima en \$ 5 000 millones de pesos, requeridos para instalar la capacidad restante en el país, con el fin de tratar los 125 m³/seg deficitarios en la actualidad, más un mercado que crece debido al aumento continuo de la población.

Tratamiento anaerobio de las aguas residuales en la producción de ácido tereftálico

TEREFTALATOS MEXICANOS, S.A. DE C.V.
Predio Buenavista de Torres, Rancho "El Pipinaco"
Cosoloeaque, Ver.

Mediante pruebas realizadas a nivel de laboratorio y planta piloto, se ha comprobado que el agua residual proveniente de la producción de ácido tereftálico puede ser tratada eficientemente por un sistema anaerobio. Esta agua residual contiene los siguientes compuestos: ácido acético, ácido benzoico, ácido tereftálico y ácido p-tolúico, así como el 4-carboxibenzaldehído (4-CBA). El trabajo que se reporta, está basado en la operación de reactores experimentales de 0.5, 13, 50 y 1000 litros, con alimentación continua en algunos casos y alimentación por cargas en otros, durante diferentes periodos de tiempo. La medición de la DQO residual fue utilizada para determinar la biodegradabilidad de cada uno de los compuestos presentes, demostrando que el ácido tereftálico es el componente más difícil de degradar, sin embargo, la remoción global de DQO llega a ser superior al 90% en la corriente residual.

La producción de ácido tereftálico efectúa mediante la oxidación de p-xileno con aire en medio ácido, en la reacción se genera agua y subproductos, los cuales están presentes en el agua residual (Tabla 19).

Tabla 19. Composición del agua residual en la producción de ácido tereftálico

| Componente | Concentración ppm |
|-------------------|----------------------|
| Acido acético | 500 - 1.000 |
| Acido tereftálico | 1,10 - 2.670 |
| Acido p-tolúico | 300 - 700 |
| Acido benzoico | 50 - 450 |
| 4-CBA | 20 - 40 |
| DQO | 8,00 - 17,000 |

La Tabla 20, presenta las reacciones de oxidación por medio de las cuales se lleva hasta CO_2 y H_2O a los componentes orgánicos presentes como subproductos de reacción en el agua.

Tabla 20. Reacciones de oxidación para cada componente.

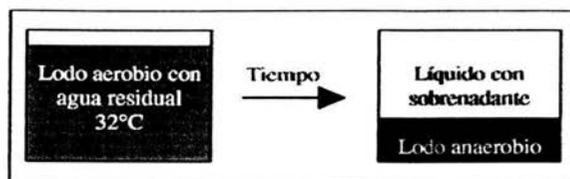
| Componente | Formula | | | PM | Reacción de oxidación | DQO |
|-------------------|---------|----|---|--------|---|-----------------------|
| | C | H | O | | | α DQO g Componente |
| ácido tereftálico | 8 | 6 | 4 | 166.13 | 2 $C_8H_6O_4 + 15 O_2 \rightsquigarrow 6 H_2O + 16 CO_2$ | 1.44 |
| ácido benzoico | 7 | 6 | 2 | 122.12 | 2 $C_7H_6O_2 + 15 O_2 \rightsquigarrow 6 H_2O + 14 CO_2$ | 1.97 |
| ácido p-tolúico | 8 | 8 | 2 | 136.15 | 1 $C_8H_8O_2 + 9 O_2 \rightsquigarrow 4 H_2O + 8 CO_2$ | 2.12 |
| 4-CBA | 8 | 6 | 3 | 150.14 | 1 $C_8H_6O_3 + 8 O_2 \rightsquigarrow 3 H_2O + 8 CO_2$ | 1.71 |
| ácido acético | 2 | 4 | 2 | 60.05 | 1 $C_2H_4O_2 + 2 O_2 \rightsquigarrow 2 H_2O + 2 CO_2$ | 1.07 |
| p-xileno | 8 | 10 | | 106.17 | 2 $C_8H_{10} + 21 O_2 \rightsquigarrow 10 H_2O + 16 CO_2$ | 3.16 |
| Metil acetato | 3 | 6 | 2 | 74.08 | 2 $C_3H_6O_2 + 7 O_2 \rightsquigarrow 6 H_2O + 6 CO_2$ | 1.51 |

Se efectuaron pruebas de laboratorio para obtener y evaluar un lodo biológico adecuado para la degradación de cada uno de los componentes en un ambiente anaerobio, así como el efecto de la temperatura de alimentación.

Fase 1: Obtención de lodo anaerobio

El lodo anaerobio experimental se obtuvo a partir de lodo activado de la siguiente manera: en un reactor de 50 litros, Figura 13, se colocaron 98% vol. de lodo activado (lodo aerobio) y 2% vol. de lodo anaerobio como semilla (proveniente de un reactor anaerobio existente), el medio en que se encontraba el lodo activado era el agua residual proveniente de la planta de producción de ácido tereftálico. Después de un período de tiempo, cercano a tres meses, en que el sistema se mantuvo en condiciones anaerobias apropiadas (temperatura de 32°C, nutrientes y micronutrientes suficientes y ausencia de O₂), se logró obtener un lodo anaerobio aclimatado al efluente a tratar y que poseía las características de un buen lodo anaerobio: formación de gránulos consistentes de 2 mm de diámetro en promedio, que no se desbaratan y que tienden a sedimentar y compatibilidad con el medio en el cual serán utilizados.

Figura 13. Esquema del sistema para obtener lodo anaerobio.



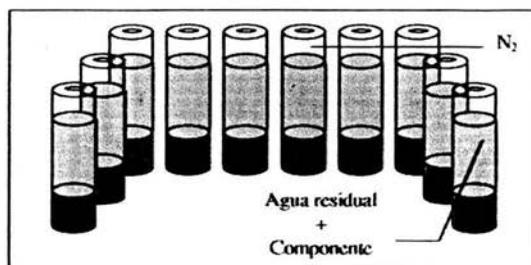
Pruebas de biodegradabilidad.

En un sistema anaerobio industrial deben cumplirse dos requisitos para lograr una operación eficiente:

- La población de microorganismos debe ser capaz de degradar los materiales que se le suministran y no sufrir intoxicación por ellos a niveles de concentración típicamente presentes. (Este es un fenómeno natural y lo único que puede hacerse es favorecerlo, buscando obtener microorganismos apropiados).
- El diseño hidráulico del reactor debe ser capaz de separar los sólidos del líquido, para que la biomasa activa no se pierda; También debe ser capaz de recuperar el gas generado para utilizarlo como combustible. (Contiene de 60 a 80% de metano).

Para verificar la compatibilidad y eficiencia de los microorganismos obtenidos se prepararon 10 borboteadores de 500 ml c/u, acondicionados como reactores, tomando volúmenes de 100 ml del lodo anaerobio obtenido con una concentración de 2,000 ppm de biomasa activa (SSV), estos fueron alimentados individualmente con agua y una cantidad medida de cada componente (2 borboteadores con ácido terftálico, 2 con ácido benzoico, 2 con ácido p-tolúico, 2 con ácido acético y 2 con agua residual) con la intención de evaluar el comportamiento del lodo. La temperatura se controló en 33°C, el pH en 7.0 y en el interior de cada reactor se mantuvo una atmósfera inerte alimentando N₂, Figura 14.

Figura 14. Esquema de operación.



La prueba duró 7 días, midiendo la DQO para determinar la eficiencia del lodo y la biodegradabilidad de los componentes del agua residual. Los resultados estandarizados se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. Resultados estandarizados de DQO remanente en reactores.

| Día | Acido Tereftálico | Acido Benzoico | Acido p-Tolúico | Acido Acético | Agua Residual |
|-----|-------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 1 | 2934.5 | 2934.5 | 2934.5 | 2934.5 | 2934.5 |
| 2 | 2164.0 | 2401.0 | 2504.5 | 2527.5 | 2540.5 |
| 3 | 2148.0 | 2259.0 | 2252.0 | 2071.0 | 2147.0 |
| 4 | 1899.0 | 2023.5 | 2182.5 | 1687.0 | 1973.5 |
| 5 | 1579.5 | 1614.5 | 1901.0 | 1285.0 | 1795.0 |
| 6 | 505.0 | 290.0 | 804.0 | 196.0 | 765.0 |
| 7 | 413.0 | 327.0 | 798.0 | 0.0 | 752.5 |

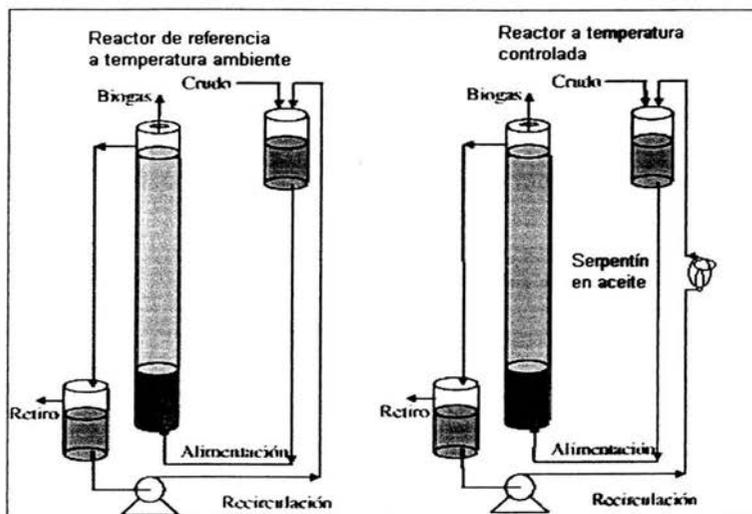
Los compuestos más difíciles de degradar son el ácido p-tolúico y el ácido tereftálico, pero se observa que todos los compuestos, incluidos estos dos, son biodegradables y que sus concentraciones típicas en el agua residual no son tóxicas para los microorganismos anaerobios.

Pruebas de temperatura

En su primera etapa, ésta prueba efectuó en un reactor de 1m^3 , en el cual el sistema se mantuvo a temperatura ambiente, siendo esta desde 24°C hasta 35°C , y al igual que en la prueba de biodegradabilidad, se analizó la DQO residual como principal variable, encontrando una remoción promedio de 72.6%.

La 2ª etapa se realizó con dos reactores UASB, Figura 15, se observó que en el caso de un incremento súbito de temperatura (de temperatura ambiente hasta 52°C promedio), disminuye la actividad anaerobia. Esta baja en la eficiencia se debe a la pérdida de población (mesofila y termofila, además se deteriora la cama de lodo, (pérdida de granulación, acidificación y mal olor).

Figura 15. Esquema de operación con dos reactores del tipo UASB.



La aplicación del tratamiento anaerobio de agua residual, es posible en la producción de ácido tereftálico, considerando que la generación del lodo anaerobio granular es a partir del lodo activado, utilizado actualmente en los sistemas aerados, dejándolo en condiciones apropiadas y durante un tiempo razonable (1-3 meses), además, al obtener éste lodo a partir de un lodo activado acostumbrado a tratar este tipo de efluentes, elimina el período de adaptación que requeriría un lodo diferente. En relación a la temperatura, se debe evitar incrementos súbitos de temperatura ya que esto podría hacer que el sistema perdiera por completo su actividad, además de perder la masa microbiana, lo cual a nivel industrial podría representar un retraso de hasta año y medio en la operación. Aunque, en períodos cortos de tiempo, es posible que el sistema pueda amortiguar incrementos de temperatura, esto dependerá de la capacidad volumétrica del reactor, la cual ayudará a disipar el calor.

VI. Conclusiones

Conclusiones

El tratamiento biológico anaerobio de aguas residuales es, en muchos casos, una opción muy atractiva para el tratamiento de efluentes químicos y petroquímicos. Comparado con el tratamiento aeróbico, ofrece algunas ventajas:

- Baja producción de biomasa por unidad de sustrato orgánico removido.
- Bajos requerimientos nutricionales, lo cual es importante para efluentes químicos y petroquímicos que tienden a ser deficitarios en nutrientes.
- Producción de una potencial fuente de energía (biogas), que puede ser usada in situ.
- Una temperatura óptima que es típica en efluentes de procesos químicos industriales.

El potencial del tratamiento anaerobio se ha reconocido en las últimas dos décadas, esto ha resultado en la constante construcción de aproximadamente 4 plantas por año. Actuales investigaciones y esfuerzos ingenieriles expandieran seguramente los tratamientos biológicos anaerobios en el futuro.

Bibliografía

Bibliografía

Ponce Abad Ana Paula, (2002)

Reactor Anaerobio de Película Fija para el Tratamiento de un Efluente de una Productora de Bebidas Carbonatadas.

Tesis de Maestría, (Fac. de Ingeniería, UNAM).

Vázquez Borges Elizabeth del Rosario, (2002).

Tratamiento de aguas residuales porcícolas

Tesis de Maestría, (Fac. de Ingeniería, UNAM)

Kleerebezem Robbert, Macario Hervé

Treating Industrial Wastewater: Anaerobic Digestión Comes of Age.

Chemical Engineering, April 2003. pp. 56-64.

Grady L. (1999)

Biological Wastewater Treatment

EUA: Mc Graw-Hill

Kiely Gerard (1999)

Ingeniería Ambiental: Fundamentos, entornos y tecnologías

España. Mc Graw-Hill.

Ármalo R. S. (1991)

Tratamiento de aguas residuales.

España, Reverté

Fair G. M., Geyer J. C., Okun D. A. (1984)

Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales.

México: Limusa.

Sincero A. P., Sincero G. A. (1996)

Environmental Engineering: A Design Approach

EUA: Prentice-Hall

Speece R.E.

ANAEROBIC BIOTECHNOLOGY FOR INDUSTRIAL WASTEWATER.

Vanderbilt University. U.S.A. 1996.

W. Wesley Eckenfelder, Jr.

INDUSTRIAL WATER POLLUTION CONTROL.

Mc. GrawHill, Inc. New York. 1995.

Benefield, Larry D. y Randall Clifford W.,

Biological Process Design for Wastewater Treatment, Prentice-Hall, Inc. N.J.,

USA, 1980.

Compendio básico del agua en México (1999)

Comisión Nacional del agua.

Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento a Diciembre de 2001

Comisión Nacional del Agua.