

31
20



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ACATLAN

DISEÑO FUNCIONAL DE UN REACTOR ANAEROBIO DE
FLUJO ASCENDENTE PARA EL TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS MUNICIPALES



T E S I S

Trabajo Profesional

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

José Luis Vargas Morales

ACATLAN, EDO. DE MEX.

1993

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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 está 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.

CONTENIDO

"DISEÑO FUNCIONAL DE UN REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS MUNICIPALES"

INDICE DE FIGURAS, TABLAS Y GRAFICAS	
RESUMEN.....	i
INTRODUCCION.....	ii
OBJETIVOS.....	iv
HIPOTESIS.....	v
1 CONCEPTOS BASICOS.....	1
1.1 DIGESTION ANAEROBIA PRINCIPIOS BASICOS.....	1
1.2 FACTORES AMBIENTALES IMPORTANTES EN LA DIGESTION ANAEROBIA.....	4
1.2.1 TEMPERATURA.....	4
1.2.2 PH.....	6
1.2.3 NUTRIENTES.....	6
1.2.4 TOXICOS.....	7
1.3 TRATAMIENTOS ANAEROBIOS DE ALTA TASA.....	9
1.4 REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE.....	11
1.5 PARAMETROS DE CONTROL Y MEDICION.....	13
2 MODELO A ESCALA PILOTO.....	15
2.1 DESCRIPCION DEL MODELO.....	15
2.2 TIPOS Y PREPARACION DE INOCULO.....	22
2.3 ANALISIS DE RESULTADOS Y PARAMETROS DE DISEÑO.....	24
3 DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO.....	32
3.1 ESTUDIOS PRELIMINARES DE LA POBLACION.....	32
3.2 CALIDAD DEL AGUA.....	33
3.3 MEMORIA DE CALCULO.....	33
4 RECOMENDACIONES PARA EL ARRANQUE, OPERACION Y MANTENIMIENTO.....	41
4.1 EQUIPAMIENTO PRELIMINAR Y PRUEBAS FINALES.....	41
4.2 PUESTA EN MARCHA O ARRANQUE.....	41
4.3 OPERACION Y MANTENIMIENTO.....	41
5 BIBLIOGRAFIA.....	43
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	Esquema de la degradación de la materia orgánica	2
Figura 2	Puntos de muestreo de la descarga de agua residual del conjunto habitacional.....	16
Figura 3	Puntos de muestreo y control.....	20
Figura 4	Tanque para preparación de lodos.....	23
Figura 5	Esquema para dimensionamiento del reactor anaerobio.....	35
Figura 6	Distribución de toberas en el reactor anaerobio de flujo ascendente.....	38
Figura 7	Vista transversal del reactor anaerobio de flujo ascendente	39
Figura 8	Vista en planta del reactor anaerobio de flujo ascendente.....	40

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Intervalos de temperaturas típicas para diversas bacterias.....	4
Tabla 2	Carga de diseño de reactores tipo UASB.....	5
Tabla 3	Efectos del sodio, potasio, calcio y magnesio en la digestión anaerobia.....	8
Tabla 4	Efecto de los sulfatos solubles en la digestión anaerobia.....	9
Tabla 5	Número y tipo de plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas existentes en México CNA 1989 (8).....	12
Tabla 6	Caracterización del agua residual generada en el Conjunto Habitacional Insurgentes, Jiutepec, Morelos Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l).....	17
Tabla 7	Caracterización del agua residual generada en el Conjunto Habitacional Insurgentes, Jiutepec, Morelos Demanda Química de Oxígeno (mg/l).....	18

Tabla 8	Caracterización del agua residual generada en el Conjunto Habitacional Insurgentes, Jiutepec, Morelos Sólidos Suspendidos Totales (mg/l).....	18
Tabla 9	Caracterización del agua residual generada en el Conjunto Habitacional Insurgentes, Jiutepec, Morelos Sólidos Suspendidos Volátiles.....	19
Tabla 10	Caracterización del agua residual generada en el Conjunto Habitacional Insurgentes, Jiutepec, Morelos Sólidos Suspendidos Fijos.....	19
Tabla 11	Resultados de los análisis de lodo en 11 muestras.....	24
Tabla 12	Porcentaje de eficiencia en remoción de DQO.....	25
Tabla 13	Porcentaje de eficiencia en remoción de DBO.....	26
Tabla 14	Porcentaje de eficiencia en remoción de SST.....	27
Tabla 15	Valores del TRH del reactor anaerobio.....	28
Tabla 16	Guía para la primera puesta en marcha de un reactor anaerobio de flujo ascendente, utilizando lodo digerido como semilla (4).....	41

INDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1	Porcentaje de eficiencia en remoción de DQO.....	29
Gráfica 2	Porcentaje de eficiencia en remoción de DBO.....	30
Gráfica 3	Porcentaje de eficiencia en remoción de SST.....	31

RESUMEN

El presente trabajo se llevó a cabo para determinar las condiciones de tratabilidad de aguas residuales domésticas.

Se realizaron pruebas a nivel escala piloto donde el agua sujeta a tratamiento por digestión anaerobia, fue introducida a un reactor anaerobio de flujo ascendente.

De las pruebas efectuadas se llegó a remociones de Demanda Bioquímica de Oxígeno del 46% de eficiencia promedio.

También se realizó el diseño funcional de un reactor anaerobio de flujo ascendente para un conjunto habitacional.

INTRODUCCION

El incremento de los costos de la energía obliga a que el tratamiento de los desechos líquidos de origen industrial y doméstico se realice utilizando sistemas que consuman poca energía, o en lugar de consumir, se tornen en fuentes energéticas.

En 1967, Mc. Carty introdujo una modificación al proceso de contacto anaerobio la que denominó el Filtro Anaerobio. Esta modificación consiste en una estructura confinada, operada en flujo ascendente, con un medio filtrante empacado a una relación de vacíos de 0.4-0.5, y es particularmente útil para el tratamiento de aguas residuales relativamente concentradas y libres de sólidos en suspensión. El filtro anaerobio es la mejor alternativa para evitar las inconveniencias del proceso anaerobio de contacto. La mayor desventaja del proceso anaerobio de contacto recae en la separación de las fases gas-sólido-líquido.

El proceso de tratamiento anaerobio emplea microorganismos anaerobios y facultativos para la estabilización de residuos orgánicos mediante conversión a metano y bióxido de carbono. Dicho proceso es deseable debido a que resulta en menores síntesis lo cual minimiza los requerimientos para la disposición de lodos, en inversiones de capital menores pues el proceso trabaja cargas comparativamente más altas que las aerobias y además produce un gas utilizable (metano).

Su aplicación al tratamiento de aguas residuales domésticas se ha venido estudiando desde hace varios años, a través de reactores de flujo ascendente con un lecho fluidizado conformado por los sólidos removidos. En este proceso prácticamente se reemplaza el medio filtrante del filtro anaerobio por un lecho de lodos microorgánicos que según los investigadores toma una configuración granular.

Dentro de los procesos de alta tasa utilizados encontramos el Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA), este sistema fue desarrollado en Holanda en la década de los 70.

En este sistema, el sustrato entra al reactor por el fondo y pasa a través de un manto de lodos, el cual es una capa densa de microorganismos en un recorrido hacia la parte superior del reactor. La mezcla gas-sólido-líquido asciende hasta alcanzar el separador gas-líquido y luego el sedimentador, localizado en la parte superior del reactor.

El proceso (RAFA) también conocido como (UASB) Upflow Anaerobic Sludge Blanket, para tratamiento anaerobio de desechos líquidos domésticos e industriales ofrece grandes perspectivas para vertimientos con concentraciones bajas (aguas domésticas), y altas

(aguas industriales) en condiciones mesofílicas y posiblemente en el próximo futuro también para condiciones psicofílicas y termofílicas.

El proceso (RAFA) es el principal proceso anaerobio de flujo ascendente a través de un manto de lodos que se utiliza actualmente.

OBJETIVOS:

- 1.- Formación de un inóculo para iniciar la operación del reactor anaerobio de flujo ascendente a escala piloto, utilizando lodos residuales digeridos de una planta de tratamiento aerobia.
- 2.- Caracterización y selección del agua residual doméstica, para ser utilizado como sustrato en el tratamiento a escala piloto.
- 3.- Evaluación de la eficiencia del proceso de digestión anaerobia utilizando un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente a escala piloto.

HIPOTESIS:

"Verificación de la utilización de un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente para el tratamiento de agua residual doméstica".

1 CONCEPTOS BASICOS

1.1 DIGESTION ANAEROBICA PRINCIPIOS BASICOS

Los contaminantes que se encuentran presentes en las aguas residuales pueden ser eliminados por medios Físicos, Químicos, y Biológicos. A los diferentes métodos individuales se les clasifica en Operaciones Físicas Unitarias, Procesos Químicos Unitarios y Procesos Biológicos.

Para la eliminación de los contaminantes por actividad biológica se utilizan Procesos Biológicos Unitarios. El desarrollo de las investigaciones de la Microbiología y el aislamiento de microorganismos han permitido el desarrollo del tratamiento del agua residual cuyo objetivo es la eliminación del contenido de materia orgánica.

Dentro de los principales procesos biológicos utilizados para el tratamiento del agua residual, los microorganismos encargados del metabolismo, se pueden clasificar según su capacidad para utilizar oxígeno en : aerobios, que son microorganismos capaces de utilizar oxígeno molecular para sus funciones vitales de crecimiento y reproducción ; anaerobios, son microorganismos capaces sólo de realizar sus funciones vitales en ambientes privados de oxígeno molecular. Existen además microorganismos que tienen la facultad de sobrevivir con o sin oxígeno, llamados facultativos.

La Digestión Anaerobia es un Proceso Biológico en el que se produce la descomposición de materia orgánica e inorgánica en ausencia de oxígeno molecular, por medio de bacterias anaerobias y anaerobias facultativas.

Se tienen definidas tres etapas en la conversión biológica de la materia orgánica por digestión anaerobia: Hidrólisis y Fermentación, Acetogénesis, y Metanogénesis. fig. 1

PRIMERA ETAPA: HIDROLISIS Y FERMENTACION

Los compuestos de bajo peso molecular (aminoácidos, sacáridos, lípidos, compuestos aromáticos), así como los polímeros naturales (la celulosa, la pectina, las proteínas) son transformados por hidrólisis y fermentación en ácidos carboxílicos, alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono. Los ácidos carboxílicos son principalmente ácidos grasos volátiles: acetato, propionato, n e iso-butilato y n e isovalérico.

Las bacterias responsables pueden ser anaerobias facultativas o estrictas. Entre las bacterias que destacan se tiene identificadas: Acetovibrio cellulolyticus, Clostridium thermocellum, Clostridium populeti, Clostridium cellulolyticum.

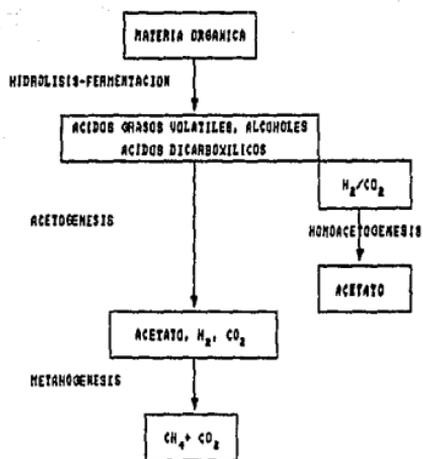


FIG. 1 ESQUEMA DE LA DEGRADACION ANAEROBICA DE LA MATERIA ORGANICA (9)

SEGUNDA ETAPA: HOMOACETOGENESIS

Es aquí donde los productos de la etapa anterior son transformados en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono, por bacterias Acetogénicas Productoras Obligadas de Hidrógeno (APOH). El hidrógeno que producen inhibe sus funciones, por lo que tienen una estrecha relación con bacterias que remueven hidrógeno, bacterias conocidas como hidrogenofílicas, que por lo general son metanogénicas, y en caso de existir sulfatos en el medio, las Bacterias Sulfato Reductoras (BSR) substituyen a las metanogénicas. Cuando el medio carece de sulfatos, ciertas BSR suelen establecer una relación simbiótica con las metanogénicas hidrogenofílicas.

Como ejemplo de bacteria homoacetogénica se tiene a Clostridium formicoaceticum, Acetobacterium woodii.

Las Bacterias Sulfato Reductoras BSR, se pueden dividir en dos grupos:

GRUPO I.- Capaces de oxidar parcialmente el lactato en acetato y dióxido de carbono en ausencia de sulfatos. También pueden utilizar etanol. Las bacterias más representativas son Desulfovibrio vulgaris y Desulfovibrio desulfuricans.

GRUPO II.- Capaces en presencia de sulfatos en el afluente de realizar la oxidación de los ácidos grasos volátiles y de compuestos aromáticos, y en ausencia de sulfatos, las bacterias APOH substituyen a las BSR en la degradación de ácidos grasos volátiles.

TERCERA ETAPA: METANOGENESIS

Se considera la última etapa del proceso, donde actúan las bacterias metanogénicas anaerobias estrictas, requieren de un potencial de óxido-reducción inferior a -330 milivolts para iniciarse la metanogénesis.

Las bacterias encargadas de ésta etapa pueden dividirse en dos:

1) las bacterias hidrogenofílicas no acetoclásticas:

La mayoría de estas bacterias pueden utilizar al formato, sin embargo estas bacterias no pueden utilizar al acetato como fuente de energía, pero algunas lo pueden usar como fuente de carbono.

Ejemplos de estas bacterias y las más utilizadas en estudios bioquímicos y fisiológicos son; Methanobacterium formicum (basillus), Methanospirillum hungatei (largos filamentos), Methanobrevibacter sp (pequeños bastoncitos) Methanobacterium thermoautotrophicum (especie termofílica largos bacilos).

La materia orgánica en dicho proceso se convierte biológicamente en Metano CH₄ y Dióxido de Carbono CO₂, obteniéndose residuos de materia celular que son sedimentados y su contenido en organismos patógenos es bajo. (1)

Las bacterias productoras de metano se conocen como metanógenos, las cuales comprenden todas aquellas bacterias que producen gas y no aquellas designadas como oxidadoras de metano. Estas bacterias metanógenas han sido aisladas de digestores anaerobios junto con otras anaerobias obligadas tales como: Clostridia y anaerobias facultativas como la Propionibacteria Butyrobacter y Lactobacillus. Las bacterias metanógenas incluyen los siguientes géneros identificados: Metanococcus, Metanobacterium, Metanosarcina, Metanospirillum y Metanobacillus. (2)

ii) Bacterias metanogénicas acetoclásticas.

En este grupo de bacterias algunas pueden utilizar el metanol, las metilaminas y el hidrógeno. La utilización de los procesos biológicos para el tratamiento de las aguas residuales, requiere del conocimiento de los factores ambientales necesarios para diseñar y controlar el medio ambiente adecuado a los microorganismos encargados de la reducción de la materia orgánica.

1.2 FACTORES AMBIENTALES IMPORTANTES EN LA DIGESTION ANAEROBICA

1.2.1 TEMPERATURA

La temperatura es de vital importancia en la digestión anaerobia. Incrementos en la temperatura aumentan la velocidad de reacción para los microorganismos, duplicándose cada 10 °C hasta alcanzar la temperatura límite. El intervalo en que se desarrollan mejor los microorganismos, para diversas bacterias se señalan en la tabla 1, las bacterias se clasifican en crisófilas o psicrofílas, mesófilas y termófilas. (1)

Tabla 1 Intervalos de temperaturas típicas para diversas bacterias. (1)

TIPO	Temperatura Intervalo	°C Optimo
Crisófilas	-2 a 30	12 a 18
Mesófilas	20 a 45	25 a 40
Termófilas.	45 a 75	55 a 65

La temperatura óptima para la digestión anaerobia es aproximadamente 37 °C, un rango aceptable oscila entre 15 y 25 °C hasta un rango relativamente alto de 30 a 40 °C. (3)

Lettinga y colaboradores afirman que el proceso es efectivo del orden de los 10 °C o más, aunque su uso en condiciones extremas de temperatura no puede ser excluido.

A temperatura de 20 °C (temperatura de tratamiento) y 13-17 °C, resultaron en eficiencias de 65-85% y 55-70%, en la reducción de la DQO. Estos datos son para tiempos de detención de 14-17 hs., cargas hidráulicas de 2 m³/m³día y condiciones de tiempo seco cuando se tratan aguas residuales domésticas de un sistema de recolección combinado. (4)

Kooijams cita en la tabla 2 una propuesta en cuanto a la capacidad de diseño del reactor tipo UASB en función de la temperatura del líquido. (4)

Tabla 2. Carga de diseño de reactores tipo UASB

T (°C)	CARGA DISEÑO (kg DQO/m ³ día)
40	15-25
30	10-15
20	5-10
15	2-5
10	1-3

Kooijams (4) indica, para una temperatura del líquido de 24-26 °C, una producción de gas metano de 0.5 a 0.65 m³/ día con desechos domésticos.

El uso de temperaturas termofílicas en la digestión anaerobia, incrementa la velocidad de digestión. Con la operación del reactor en la fase termofílica, se obtienen lodos más fácil de deshidratar y con una mayor remoción de patógenos. Sin embargo los costos relativos al equipamiento son muy altos en general y no compensan la utilización de temperaturas termofílicas; temperaturas más alejadas de la ambiente generalmente provocan problemas con los controladores de temperatura, provocando serios problemas por las variaciones extremas inducidas al reactor. (5)

1.2.2 PH

El pH es un parámetro de calidad de las aguas naturales así como de las aguas residuales. La característica ácida, básica o neutra en un agua residual juega un papel de suma importancia. La determinación y control de dicho parámetro puede medirse con un peachimetro, o con papel pH.

Arrhenius (1903) definió como Acido a toda sustancia que al entrar en solución acuosa aumenta la concentración de los iones hidrógeno de la solución, y como Base a todas las sustancias que al entrar en solución acuosa aumenta la concentración de iones hidróxido (oxhidrilo o hidroxilo) de la solución. (6)

Sorensen (1868-1939) introdujo el concepto de pH, y en base a este se desarrolló una escala que va desde cero hasta catorce; de esta forma una solución es Ácida si su pH se encuentra en el rango de 0 a 7, Básica (alcalina) de 7 a 14, Neutra si su pH es igual a 7. (6)

Para mantener un sistema de tratamiento anaerobio que establezca el residuo orgánico, las bacterias formadoras de ácidos y metano requieren de una alcalinidad suficiente como para asegurar que el pH del sistema no descienda por debajo de 6.2, ya que las formadoras de metano no actúan por debajo de dicho punto. Un rango de 6.6 a 7.6 es deseable para que la digestión anaerobia prosiga normalmente, la alcalinidad oscilará entre 1000 a 5000 mg/l. (1)

La alcalinidad total del sistema es la suma de alcalinidades debida al bicarbonato y a los propios ácidos volátiles.

El contenido de alcalinidad en un sustrato de tipo doméstico se sitúa entre 2500 y 4000 mg/l como carbonato de calcio CaCO_3 , y los ácidos volátiles oscilan entre 50 a 150 mg/l como ácido acético HA_c . (4)

Cuando la alcalinidad debida a los ácidos volátiles sea mayor que la producida por la alcalinidad debida al bicarbonato, el sistema pasa a ser inestable, pudiendo sufrir sensibles bajadas de pH, a cualquier nuevo aumento en la concentración de ácidos volátiles.

Un valor de alcalinidad de bicarbonato de 2500 a 5000 mg CaCO_3 /l es deseable, dándole al medio en digestión un buen poder de comportamiento. (5)

1.2.3 NUTRIENTES

La relación del contenido de carbón de las bacterias responsables de la digestión anaerobia, con respecto al nitrógeno y fósforo debe observar concentraciones que satisfagan las siguientes relaciones: C/N menor o igual a 30 y C/P menor o igual a 150. Estas relaciones se refieren al contenido disponible para las

bacterias, pero si no se cumplen estas relaciones se puede considerar suficiente C/N menor o igual a 20 y C/P menor o igual a 100. Cuando no se tengan cantidades suficientes de N y P deberán ser adicionadas. (4)

1.2.4 TOXICOS

Para poder considerar la toxicidad de compuestos químicos en la digestión anaerobia, se debe tomar en cuenta los siguientes fundamentos.

- Un compuesto sólo es biológicamente tóxico cuando se encuentra en solución.
- Toxicidad es un término relativo. Dependiendo de la concentración en que se encuentre, una misma sustancia puede ser estimulante o tóxica.
- Cuando ocurre una adecuada aclimatación de las bacterias a los compuestos tóxicos, se pueden adaptar hasta un cierto límite a concentraciones elevadas.
- Considerar la posibilidad de ocurrencia de antagonismo (reducción del efecto tóxico de una sustancia por la presencia de otra) o sinergismo (aumento del efecto tóxico de una sustancia por la presencia de otra).

Para evitar concentraciones inhibitorias en los digestores el sustrato puede ser diluido.

La inhibición por cargas de choque de compuestos tóxicos se refleja por la casi inmediata falta de gases, y la elevación en la concentración de los ácidos volátiles.

Los ácidos volátiles se acumulan por aumentos repentinos de la carga orgánica aplicada, sobrecarga hidráulica que resulta en el lavado de las bacterias metanogénicas, sobrecargas de compuestos tóxicos, así como variaciones bruscas de temperatura, pH, etc. Concentraciones de 6000 a 8000 mg/l de ácidos volátiles, no representan problema a la digestión anaerobia siempre que el pH del sistema sea mantenido próximo a la neutralidad.

La cantidad de ácidos volátiles se puede determinar a través de cromatografía gaseosa o de métodos simplificados de titulación directa. Este último es bastante aproximado y puede ser utilizado para el control de digestores, sin embargo no es lo suficiente exacto para trabajos de investigación. El ácido propiónico es considerado el más tóxico a la digestión anaerobia. (4)

Yang encontró que las bacterias metanogénicas se pueden aclimatar en concentraciones de Cianuros de 20 a 40 mg/l. Concentraciones de 750 mg/l provocaron fuerte inhibición al proceso, sin embargo, al controlarse el tóxico, el proceso de digestión se recuperó en pocos días. (5)

Neufeld (4) observó inhibición del proceso de digestión por fenoles a concentraciones arriba de 700 mg/l, cuando fue permitida una adecuada aclimatación. Una remoción efectiva de los Fenoles ocurre a edades de lodos superiores a 40 días. Cuando se presenten elevadas concentraciones de Fenoles se puede recurrir a la utilización del carbón activado en filtros anaerobios de lecho fluidizado.

Los metales alcalinos y alcalino-terrosos como el sodio, potasio, calcio y magnesio se utilizan para regular el pH en los digestores. Efectos antagónicos o sinérgicos pueden producirse si son adicionados en cantidades como las que se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Efectos del sodio, potasio, calcio y magnesio en la digestión anaeróbica, según McCarty. (5)

Cati6n	Estimulante	Concentraciones (mg/l)	
		Moderadamente inhibidor	Fuertemente inhibidor
Sodio	100-200	3500-5500	8000
Potasio	200-400	2500-4500	12000
Calcio	100-200	2500-4500	8000
Magnesio	75-150	1000-1500	3000

Las bacterias metanogenas se consideran estrictamente anaerobias, por lo que cualquier traza de Oxígeno puede perjudicar, sin embargo raras veces esto conduce a serios problemas.

Fields y Agardy (4) mostraron que para 0.01 volúmenes de aire por volumen de lodo digerido no afectan la digestión. Para 360 mg/l de O₂ suministrados de una sola vez, no afectaron al digestor, pero la adición de una sola vez de 1300 mg/l de O₂ provocó inhibición.

Khan y Trottier (4) verificaron que los compuestos inorgánicos de Azufre aumentan la inhibición en el siguiente orden: sulfatos, tiosulfatos, sulfitos, sulfuros, y H₂S. Todos los mencionados a excepción de los Sulfatos a concentraciones de 290 mg/l provocaron inhibición.

Sheehan y Greenfield (4) mostraron también que con 6750 mg/l de Sulfatos ó más, la digestión anaerobia se inhibe. Sólo cuando los Sulfatos son insolubles, no ejercen efectos tóxicos. En la tabla 4 se resumen las concentraciones tolerables.

Tabla 4. Efecto de los sulfatos solubles en la digestión anaerobia Lawrence y McCarty. (5)

Concentración de sulfatos solubles (mg/l)	Efecto en la digestión anaerobia
50 a 100	tolerable sin aclimatacion
hasta 200	tolerable con aclimatacion
arriba de 200	bastante toxico

Los surfactantes son los agentes activos de los detergentes, constituidos por alquilbenzenos sulfonatos ABS (detergentes no biodegradables) y de alquilbenzeno lineales LAS en el caso de detergentes biodegradables.

Aun cuando LAS es biodegradable aerobiamente, este no se degrada en gran medida bajo condiciones anaerobias.

Ambos ABS y LAS provocan inhibición a concentraciones entre 600 y 900 mg/l. (4)

1.3 TRATAMIENTOS ANAEROBIOS DE ALTA TASA

Los procesos de tratamiento considerados de alta tasa (extra rápidos), están basados en un modelo de inmovilización bacterial.

Las características de algunos reactores modelo utilizados son:

- 1.- La formación y/o creación de lodo altamente sedimentable, con un separador de gas integrado en la parte superior del reactor y un sedimentador interno de lodos.
- 2.- Utilización de partículas de alta densidad para crecimiento bacterial sobre la superficie, o sobre estructuras de soporte inmóviles.
- 3.- Combinación de los anteriores, lodos densos, material de soporte en la parte superior para crecimiento bacterial así como separador de gases en la parte superior. (3)

El diseño de los reactores anaerobios utilizados actualmente, se fundamenta en la obtención de una alta concentración de microorganismos, tiempos de retención de lodos bastante largos y tiempos de retención hidráulicos cortos, por lo que son denominados de alta tasa.

Los procesos de alta tasa más utilizados son los siguientes:

- **Contacto anaerobio** el cual consiste en dos etapas, la primera genera un lodo activado (licor mixto), por la agitación en el reactor, el efluente pasa a una segunda etapa donde es sedimentado. La edad del lodo se controla con la línea de recirculación o en el tanque de mezcla.

El tiempo de retención hidráulico es superior a 1 día, logrando una eficiencia relativamente alta, del 70%. La concentración de microorganismos en el reactor puede llegar hasta 30 grs. de SSV/l y las cargas aplicadas son del orden de 2 a 10 kg DQO/m³/día. (7)

El punto problemático de este proceso es la adecuada separación del lodo anaerobio en el sedimentador, por la tendencia del lodo a flotar por el gas que se encuentra adherido al floculo, lo que se puede resolver creando una zona de vacío en la línea de unión entre el reactor y el sedimentador. (8)

- **Reactor anaerobio de lecho suspendido** también conocido como **Reactor anaerobio de flujo ascendente**, donde el sustrato a ser tratado entra por la parte inferior y pasa a través de una capa densa de microorganismos granulares o floculados. El sustrato entra en contacto con dichos microorganismos en su recorrido ascendente, hacia la parte superior del reactor, hasta alcanzar un separador gas-sólido-líquido. Los sólidos son retornados al fondo del reactor y el gas es separado por la campana recolectora de gas, finalmente el agua es desalojada por una canaleta.

La capa densa de microorganismos encargados de la conversión de materia orgánica, puede llegar hasta 100 grs. de SSV/l dentro del reactor.

Todavía existen muchas incógnitas sobre el proceso que se lleva a cabo dentro del reactor, sin embargo se han obtenido buenos resultados al aplicarse en efluentes industriales, con altas concentraciones, además se estudia la posibilidad de su utilización con efluentes de bajo contenido de materia orgánica, como son las aguas residuales domésticas. (7)

- **Filtro anaerobio** consiste en un reactor el cual contiene un medio donde creará una película sobre dicho soporte, en forma similar como ocurre en los filtros percoladores. El flujo puede ser introducido en forma ascendente o descendente, pero el flujo descendente puede producir colmatación del medio.

El tiempo de retención hidráulico es igual o superior a 24 horas, además no se requiere de una disposición final de los lodos, ya que estos salen en el efluente en bajas concentraciones, y la purga de los lodos son evacuados aumentando la carga hidráulica, expandiendo el medio filtrante. (7)

La carga volumétrica aplicada al reactor oscila entre 1 y 20 kg/m³/día y las eficiencias obtenidas oscilan entre 70 y 90% dependiendo del tipo de desecho. (7)

El medio de soporte empacado en el reactor consiste en piedras de 3 a 5 cm. de diámetro promedio, pueden ser utilizados medios plásticos como soporte. El coeficiente de vacío debe ser grande para evitar el taponamiento, sin embargo el arreglo desordenado del soporte no permite la purga de lodo acumulado, lo que provoca una acumulación lenta pero constante de biomasa. (8)

Como una modalidad de los reactores de película fija, pero cuya característica esencial es un soporte suficientemente pequeño y ligero para que sea fácilmente fluidizado con una recirculación del efluente, se tiene a nivel piloto, a escala semi-industrial y en algunos casos a escala real, un Reactor de lecho expandido y el Reactor de lecho fluidizado, siendo semejantes entre sí, diferenciándose en el grado de fluidificación del soporte (20% para el lecho expandido y superior al 50% para el lecho fluidizado). Su avance consiste en tiempos de retención aún menores, inferiores a 12 horas, ya que la superficie de soporte disponible es muy elevada (superior a 200 m²/m³) y la agitación en el lecho es vigorosa, eliminando los problemas de transferencia de sustrato. Como ventaja adicional se evita el taponamiento. Su inconveniente es que tiene la necesidad de energía para la recirculación y la fluidificación del lecho. La carga aplicada puede ser superior a los 40 kg DQO/m³ día. (8)

1.4 REACTOR ANAEROBICO DE FLUJO ASCENDENTE

En México, la utilización de sistemas convencionales para el tratamiento de las aguas residuales y control de la contaminación de los cuerpos receptores es inadecuado y preocupante. De acuerdo con datos de la Comisión Nacional del Agua para las poblaciones con más de 10000 habitantes se tienen 256 plantas de tratamiento, con una capacidad instalada de 14 m³/s, lo que representa tan solo el 12 % del caudal evacuado. (8)

En la tabla 5 se presentan los diferentes procesos adoptados y utilizados en México, y de las 256 plantas el 65% 166 plantas no funcionan, el 23%, 59 funcionan entre el 40 y 80 % de su eficiencia, y el restante 5%, 13 funcionan con eficiencias mayores del 80 %.

Tabla 5. Número y tipo de plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas existentes en México CNA, 1989. (8)

Proceso	Cantidad	Porcentaje
Laguna de estabilización	138	54
Tratamiento primario	33	13
Tratamiento secundario	85	33
- lodos activados	33	
- aeración extendida	5	
- filtros rociadores	7	
- zanjas de oxidación	10	
- lagunas aeradas	17	
- ¿otro tipo?	13	
total	256	100

Las razones de la deficiente utilización de la infraestructura existente, en la mayoría de los casos se debe a la falta de operación y el abandono de las plantas de tratamiento, y en otras ocasiones el municipio no puede absorber los costos de energía, operación y mantenimiento, ya que aunque los créditos para la construcción de la planta son manejables, no se consideran los recursos necesarios para la operación y el mantenimiento al seleccionar el proceso. La falta de operadores calificados es otro de los problemas.

La creciente necesidad de plantas de tratamiento adecuadas a las necesidades del país, aunado a los problemas que enfrenta la utilización de procesos convencionales antes mencionados, y a su vez, una política más estricta por parte del gobierno hace necesario considerar las opciones tecnológicas disponibles y no depender y limitarse a los procesos convencionales. Ante este contexto la tecnología anaerobia se presenta como una opción adecuada a las necesidades actuales. (8)

El reactor anaerobio de flujo ascendente y manto de lodos está constituido básicamente por un tanque denominado reactor, en cuya parte superior se encuentra adaptado un decantador o deflector para la separación de los gases formados en la digestión anaerobia, desviando el gas a un área aislada del reactor donde se almacena para su posterior utilización o quema. El decantador funciona como un sedimentador provocando el retorno del lodo por gravedad hacia la cámara de digestión, en contracorriente con el flujo ascendente lo que permite una mezcla uniforme.

Se denomina anaerobio por las condiciones del medio ambiente creadas dentro del reactor, ausencia de oxígeno. El sustrato a ser tratado es introducido por la parte inferior del reactor donde se encuentra el manto de lodos y mediante una adecuada distribución del sustrato en el fondo, se mezclan el lodo y sustrato provocando un flujo ascendente.

Las principales características que debe reunir un reactor anaerobio de flujo ascendente son:

- Una efectiva separación del biogas, del agua tratada y del lodo;
- El lodo cultivado debe mantener excelentes propiedades de sedimentabilidad y alta actividad específica.
- Una distribución del sustrato en el fondo del reactor lo más uniforme posible.

1.5 PARAMETROS DE CONTROL Y MEDICION

El control y la medición de los parámetros utilizados en la evaluación y operación de un RAFA, para mantener las condiciones necesarias para el buen funcionamiento del proceso de digestión anaerobia, debe responder a la necesidad de corregir cualquier estado de desequilibrio en el reactor y cumplir con las condiciones siguientes:

- Mantener el pH entre 6.5 y 7.5 , en caso de variación corregir por medio de la adición de nutrientes ó a través de variación en los parámetros del proceso.
- Evitar variaciones de temperatura bruscas.
- Aplicar la carga orgánica, el tiempo de retención hidráulico y celular dentro del reactor acorde con el residuo a ser digerido y con el tipo de digestor utilizado.
- Existencia de cantidades de N y P en el sustrato, compatible con la cantidad de carbono.

Los principales parámetros de control y medición de un proceso de digestión anaerobia son los siguientes:

- Volumen y composición de gases producidos
- Temperatura
- Ácidos volátiles
- Alcalinidad
- Potencial de óxido-reducción
- DBO/DQO
- Sólidos totales y volátiles
- La relación C/N/P
- Amoníaco
- La relación sulfatos / sulfitos
- Metales pesados
- Metales alcalinos y alcalinotérreos

Se puede prescindir de muchas de estas determinaciones, dependiendo del sustrato a ser digerido, así como adicionar algunas otras determinaciones según el uso que se pretenda dar al efluente líquido, efluente gaseoso y lodo residual.

2 MODELO A ESCALA PILOTO

2.1 DESCRIPCION DEL MODELO

La parte experimental del presente proyecto se realizó con un modelo a escala piloto que se instaló en un conjunto habitacional, ubicado en la Avenida de los Insurgentes, Jiutepec Morelos.

Objetivos:

- Formación de un inóculo para iniciar la operación del reactor anaerobio de flujo ascendente a escala piloto, utilizando lodos residuales digeridos de una planta de tratamiento aerobia.
- Caracterización y selección del agua residual doméstica, para ser utilizada como sustrato en el tratamiento a escala piloto.
- Evaluación de la eficiencia del proceso de digestión anaerobia utilizando un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente a escala piloto.

2.1.1 SISTEMA DE RECOLECCION DE AGUAS RESIDUALES.

El conjunto habitacional cuenta con un cárcamo de bombeo de las aguas residuales, para ser bombeadas a un colector que transporta las aguas residuales de la zona industrial del Valle de Cuernavaca, hacia la planta de tratamiento Empresa para el Control de la Contaminación del Agua de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca ECCACIV.

El cárcamo dejó de bombear por falta de recursos para el pago del tratamiento del agua residual, por parte de los habitantes del conjunto habitacional.

Actualmente el cárcamo funciona como un tanque de almacenamiento. Se encontraron problemas de acumulación de lodos, que producen malos olores, y se descarga el agua sin tratamiento a un canal. Además en época de lluvia, el tanque no tiene la capacidad para evacuar los excedentes que se presentan, y el lodo acumulado se derrama hacia la calle, lo que representa un punto de contaminación y de enfermedades.

Para la toma de muestras del agua residual del conjunto habitacional, se localizaron 3 puntos de muestreo, como se muestra en la fig. 2.



FIG. 2. PUNTOS DE MUESTREO DE LA DESCARGA DE AGUA RESIDUAL DEL CONJUNTO HABITACIONAL.

Los análisis de laboratorio para la caracterización del agua residual son: Demanda Química de Oxígeno, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Sólidos suspendidos totales, Sólidos suspendidos volátiles y Sólidos suspendidos fijos.

En las tablas 6, 7, 8, 9 y 10 presenta los resultados obtenidos en 5 muestras, para los 3 puntos. El punto 1 ofrece las características más representativas del agua residual que genera el conjunto habitacional. El punto 2 presenta una gran variabilidad en los parámetros analizados y presenta problemas de azolvamiento y acumulación de grasas. El punto 3 resulta inadecuado, debido a que las características del agua al salir del tanque cambian por el tiempo de retención hidráulico.

Tabla 6. Caracterización del agua residual generada en el conjunto habitacional Insurgentes, Jiutepec Mor. Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)

Fecha	Puntos de Muestreo		
	1	2	3
9-08-90	142	111	92
16-08-90	183	263	224
23-08-90	303	323	285
31-08-90	307	2553	201
07-09-90	126	1916	292

\bar{x}	212	1033	219
σ^2	77	1003	72

Tabla 7. Caracterización del agua residual generada en el conjunto habitacional Insurgentes, Jiutepec Mor. Demanda Química de Oxígeno (mg/l)

Fecha	Puntos de Muestreo		
	1	2	3
9-08-90	492	556	314
16-08-90	390	597	427
23-08-90	618	777	361
31-08-90	626	10775	485
7-09-90	381	8378	547

\bar{x}	501	4216	466
σ^2	106	4400	90

Tabla 8. Caracterización del agua residual generada en el conjunto habitacional Insurgentes, Jiutepec Mor. Sólidos suspendidos totales (mg/l)

Fecha	Puntos de Muestreo		
	1	2	3
9-08-90	133	619	112
16-08-90	137	396	85
23-08-90	240	355	197
31-08-90	270	11041	195
7-09-90	106	5900	170

\bar{x}	177	3662	152
σ^2	65	4250	45

Tabla 9. Caracterización del agua residual generada en el conjunto habitacional Insurgentes, Jiutepec Mor. Sólidos suspendidos volátiles

Fecha	Puntos de Muestreo		
	1	2	3
9-08-90	124	322	86
16-08-90	109	201	75
23-08-90	233	297	155
31-08-90	195	5615	125
7-09-90	110	3433	150

\bar{x}	154	1973	118
σ^2	50	2194	33

Tabla 10. Caracterización del agua residual generada en el conjunto habitacional Insurgentes, Jiutepec Mor. Sólidos suspendidos fijos

Fecha	Puntos de Muestreo		
	1	2	3
9-08-90	4.6	297	26
16-08-90	28	195	10
23-08-90	7	58	42
31-08-90	75	5424	70
7-09-90	6	2467	20

\bar{x}	24	1688	34
σ^2	27	2068	21

El modelo a escala piloto, fue construido en mica transparente, con un diámetro de 40 cm., y una altura de 92 cm lo que da un volumen de 115 litros de capacidad del reactor. En la parte superior fue adaptado un cono, de altura 30 cm. y radio de 19 cm, utilizando la fórmula del volumen de cono circular recto se obtiene un volumen útil de 11.34 litros, la finalidad es separar el gas del reactor para ser almacenado y quemado, así como la sedimentación de los lodos por gravedad. Ver fig. 3.

DIAGRAMA DE FLUJO

- 1.- POZO DE VISITA
- 2.- PICHANCHA
- 3.- LINEA DE ALIMENTACION
- 4.- BOMBA PERISTALTICA
- 5.- DIFUSOR DE SUSTRATO
- 6.- INOCULO
- 7.- LLAVE PARA MUESTREO
- 8.- LLAVE PARA MUESTREO
- 9.- LLAVE PARA MUESTREO
- 10.- SEDIMENTADOR
- 11.- ALMACENAMIENTO DE GAS
- 12.- EFLENTE

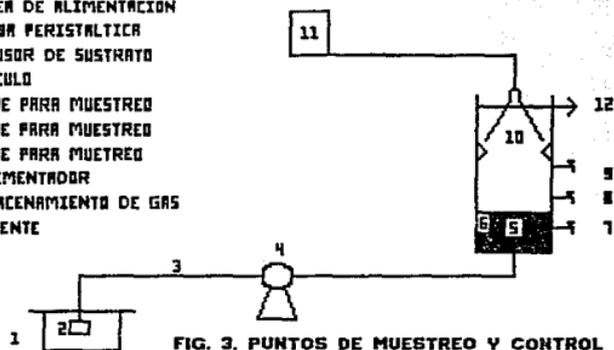


FIG. 3. PUNTOS DE MUESTREO Y CONTROL

Se adaptaron tres válvulas en la pared del reactor a una distancia entre válvulas de 30 cm a partir del fondo del reactor. Se utilizarán como puntos de muestreo, para extraer muestras del interior del reactor.

En el fondo del reactor se instaló un difusor del sustrato, utilizando tubo de 3/4 de pulgada, 1.905 cms. Se perforaron cuatro agujeros en el difusor para distribuir uniformemente el sustrato.

La alimentación del reactor se realiza con una bomba peristáltica marca Masterflex, para poder regular el gasto que se requiera y lograr mantenerlo constante en cada etapa del experimento. La bomba tiene una capacidad de alimentación de 6 a 300 ml/min. por medio de un cabezal que es controlado por un regulador de velocidad.

El sustrato fue alimentado en forma continua durante todo el experimento, 24 horas por día, lo que requirió de una supervisión de todo el proceso, monitoreando los parámetros que se mencionan en el subcapítulo Parámetros de Control y Medición, así como la operación, mantenimiento y análisis de laboratorio.

La toma del sustrato utilizado se ubica a 18 metros de distancia de la caseta de bombeo a un pozo de visita del Conjunto Habitacional, donde se recibe la descarga de todo el Conjunto Habitacional. En dicha toma, fue adaptada una pichancho fabricada en el lugar, utilizando un bote de plástico y en la superficie fueron hechas perforaciones de 1 a 1.5 mm de diámetro.

El pozo de visita funciona como un desarenador y separador de sólidos flotantes lo que permitió alimentar el sustrato predecantado.

El gas que se genera por la digestión anaerobia en el reactor, es almacenado utilizando dos botes de plástico uno invertido dentro del otro en agua. Previamente el gas pasa a través de un matrás kitazato, que contiene agua y su finalidad es permitir observar la burbuja, y saber si el reactor está produciendo gas.

La disposición del gas se efectúa retirando la manguera de la parte superior y con un cerillo previamente encendido se quema el gas, la flama que se produce nos da una idea de la calidad del gas. En ocasiones no se quemó gas, esto debido al poco volumen de almacenamiento y al posible intercambio de gas por aire, ó a la inhibición del proceso anaerobio por algún tóxico presente en el agua residual.

2.2 TIPOS Y PREPARACION DE INOCULO

La formación de un lodo granular es considerado como la habilidad más importante del proceso de estabilización del RAFA. Se pueden obtener diferentes tipos de lodo granular, dependiendo de la composición del sustrato, la naturaleza del inóculo, y de las condiciones del proceso.

Lettinga (3) describe la formación de 3 tipos de lodo granular:

- Gránulos de Sarcina. Se forman en un sustrato rico en ácido acético, por las ventajas cinéticas que presenta la Metanosarcina bajo estas condiciones de crecimiento comparado con otros organismos acetoclásticos.
- Gránulos filamentosos. Al inocular el reactor utilizando lodos digeridos, de una planta aerobia y como sustrato una mezcla de ácidos grasos volátiles, se han obtenido gránulos que consisten principalmente de bacterias con largos filamentos, presumiblemente *Methanothrix soehngenii*, la mayoría crecen sobre partículas inertes o pobremente biodegradadas.
- Gránulos cilíndricos. Fragmentos cortos cilíndricos, formados por 4 ó 5 células de *Methanothrix*, fueron obtenidos en reactores a escala industrial, depurando desechos de azúcar o papa.

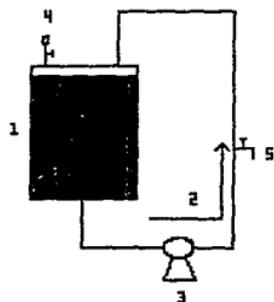
Preparación de inóculo.

El día 10 de Julio de 1990 se tomaron 180 lts. de lodo, de la planta de tratamiento de ECCACIV, del tanque de acondicionamiento de lodos. Las características físicas del lodo son; color negro, fuerte olor, y de consistencia muy densa, característico de lodos anaerobios.

El lodo fue introducido a un bidón de 200 lts., al cual se le acondicionó una bomba de 1/4 de HP, y una tubería para recirculación del lodo, homogenizar la adición de nutrientes y preparación de muestras para análisis, el esquema de este montaje aparece en la fig 4.

Las condiciones creadas dentro del bidón fueron lograr un medio ambiente anaeróbico para acelerar el crecimiento de bacterias anaeróbicas. Se adicionaron nutrientes, 150 mg de acetato de sodio y 150 mg de acetato de calcio cada tercer día.

Se realizaron al lodo análisis de sólidos suspendidos totales, volátiles y fijos, se midió el pH, y se quemó el gas generado dentro del bidón por medio de una válvula que se muestra en la figura 4.



- 1.- ALMACENAMIENTO DE LODOS
- 2.- TUBERIA PARA RECIRCULACION
- 3.- BOMBA
- 4.- VALVULA PARA QUEMA DE GAS
- 5.- LLAVE PARA MUESTREO LODOS

FIG. 4. TANQUE PARA PREPARACION DE LODOS

En la tabla 11 se muestran los resultados obtenidos de los análisis efectuados al lodo. Este material es la cantidad disponible de inóculo, observándose una cantidad promedio de 13571 mg/l de SSV considerablemente buena, sin embargo la cantidad de SSF de 4772 mg/l es también alto, este material no se considera como inóculo porque representan los sólidos inorgánicos.

El pH medido al inóculo se encuentra en un rango aceptable para las bacterias metanogénicas que es de 6.5 a 7.5.

Tabla 11. Resultados de los análisis de lodo en 11 muestras.

FECHA	HORA	pH	SOLID.	SUSP. mg/lt		OBSERVACIONES
			SST	SSV	SSF	
110790	10:00	6.28	21211	16268	5122	SE PURGO GAS
270790	10:00	6.46	19011	14900	4111	SE PURGO GAS
310790	10:00	6.6	15111	12383	2727	SE PURGO GAS
020890	10:00	6.8	18911	14150	4761	SE QUEMO GAS
070890	10:30	7.23	19077	13911	5166	SE PURGO GAS
140890	10:30	7.5	19594	14300	5294	SE PURGO GAS
170890	10:30	7.7	18094	13039	5055	SE PURGO GAS
210890	11:00	8.0	17683	12483	5200	SE PURGO GAS
230890	11:00	8.21	13022	9105	3916	SE PURGO GAS
290890	10:45	7.5	19050	14455	5555	SE PURGO GAS
040990	10:30	- -	19850	14294	5589	SE PURGO GAS
	\bar{x}	7.22	18055	13571	4772	

2.3 ANALISIS DE RESULTADOS Y PARAMETROS DE DISEÑO

Los resultados que se obtuvieron durante el período de operación del modelo, en el influente y efluente del reactor se presentan en la tabla 12, 13 y 14.

Como se puede observar en las tablas 12 y 13 Demanda Química de Oxígeno y Demanda Bioquímica de Oxígeno respectivamente, existe una variación inestable en la eficiencia de remoción de DQO y DBO, esto puede ser debido a la falta de una buena cantidad de microorganismos anaeróbicos productores de metano, sin embargo la producción de gas metano en un principio era de buena calidad, ya que las pruebas de quema de gas demostraban una flama bastante buena.

Tabla 12. Porcentaje de eficiencia en remoción de DQO

DIAS	FECHA	DQO (mg/l)		% EFICIENCIA
		INFLUENTE	EFLUENTE	
1	101090	801	505	36.9
2	261090	462.1	303.8	34.0
3	221190	767.3	435.6	43.0
4	301190	767.0	297.0	61.0
5	071290	544.4	65.3	88.0
6	121290	533.3	383.3	28.1
7	191290	506.0	396.0	21.7
8	211290	616.0	363.0	41.0
9	241290	836.0	561.0	33.0
10	271290	660.0	330.0	50.0
11	100191	814.0	396.0	51.4
12	160191	675.1	392.0	42.0
13	230191	638.0	445.0	30.2
14	300191	604.1	420.6	30.4
promedio				42.16

Esto confirma lo escrito en la bibliografía, que las eficiencias de remoción de carga orgánica son variables en un arranque del reactor, lo que confirma que el período de arranque es muy largo aún con inóculo.

En la tabla 12 se observa una eficiencia de remoción de DQO 36.9% que corresponde a un TRH (Tiempo de Retención Hidráulico) de 50.00 hr, este tiempo corresponde a una cronología previamente estructurada con el fin de observar el comportamiento del reactor y caracterizar el período de arranque. El uso de un tiempo tan alto y un gasto bajo fue con la finalidad de evitar la salida del inóculo. El flujo se mantuvo entre 27 y 35 ml/min. por un período de 30 días.

Al día 20 de operación del reactor se obtiene una eficiencia de 61% en remoción de DQO a un TRH de 46.15 hr, si la eficiencia continúa por siete días o más entonces el TRH será necesario disminuirlo aumentando el gasto.

Una semana después se obtiene una eficiencia del 88% con un TRH de 45.45 hr y un gasto de 33 ml/min. este punto resultó ser la máxima eficiencia obtenida por el reactor en todo el período de operación lo que se puede considerar como un arranque. Se opta por mantener el gasto, sin embargo cinco días después la eficiencia del reactor cae a un valor de 28.1% de eficiencia pero el TRH también fue el mayor 62.5 hr, momento en el cual se decide aumentar el gasto a 37 ml/min.

A los ocho días siguientes se decide poner un gasto de 54.5 ml/min. que corresponde a un TRH de 27.52 hr y la eficiencia del reactor aumenta a un 50 %.

Se opera el reactor a un TRH de 50 ml/min. por aproximadamente 17 días y la eficiencia se mantiene a un 50 %, sin embargo en la tabla 12 la eficiencia comienza a bajar, lo que nos hace disminuir el TRH y aumentar el gasto a 77 ml/min. con un TRH de 19.48 hr.

El último punto caracterizado corresponde a un valor de TRH de 13.88 hr y un gasto de 108 ml/min., la remoción de DQO es de 30 mg/l sin embargo este valor de TRH no se puede bajar debido a problemas en la inyección del agua residual, porque la bomba peristáltica sufre calentamiento en exceso y se queman los fusibles, lo que representa el fin del experimento, quedando por comprobar que eficiencias se obtendrían por debajo de estos valores.

La tabla 13 considera los mismos TRH anteriormente descritos sin embargo cabe mencionar que el promedio de remoción de DBO de 46% es un poco mayor al de DQO de 42.16%.

Tabla 13.- Porcentaje de eficiencia en remoción de DBO

DIAS	FECHA	DBO (mg/l)		% EFICIENCIA
		INFLUENTE	EFLUENTE	
1	101090	506.0	260.5	48.5
2	191090	237.7	69.82	70.6
3	261090	243.0	168.0	30.8
4	221190	432.2	216.6	49.8
5	301190	272.0	156.0	42.6
6	071290	307.0	160.0	47.8
7	121290	234.0	150.0	35.8
8	191290	249.0	160.0	35.7
9	211290	322.0	180.0	44.1
10	271290	427.5	265.0	38.0
11	040191	287.0	117.0	59.2
12	100191	367.0	150.0	51.1
13	160191	345.0	197.0	42.8
14	230191	292.0	206.6	29.3
15	300191	380.0	167.0	56.1
promedio				46.0

En la tabla 14 se puede concluir que la remoción de SST en promedio 68% se puede considerar adecuada.

Tabla 14.- Porcentaje de eficiencia en remoción de SST

DIAS	FECHA	INFLUENTE (mg/l)						% EFICIENCIA
		SST	SSV	SSF	SST	SSV	SSF	
1	101090	173	160	13	42	40	2	75.7
2	221090	173	136	40	70	40	29	60.3
3	301190	291	268	22	48	28	20	83.5
4	071290	1100	960	140	46	28	18	95.8
5	121290	90	73	13	64	54	10	28.8
6	191290	145	117	28	52	40	12	64.3
7	211290	134	97	37	39	23	15	70.8
8	100191	122	111	11	44	20	24	63.6
9	160191	96	53	43	18	5	12	81
10	300191	203	136	66	90	58	32	55.7
Promedio								68

La tabla 15 presenta los Tiempos de Retención Hidráulico que se manejaron durante el experimento con el modelo a escala piloto.

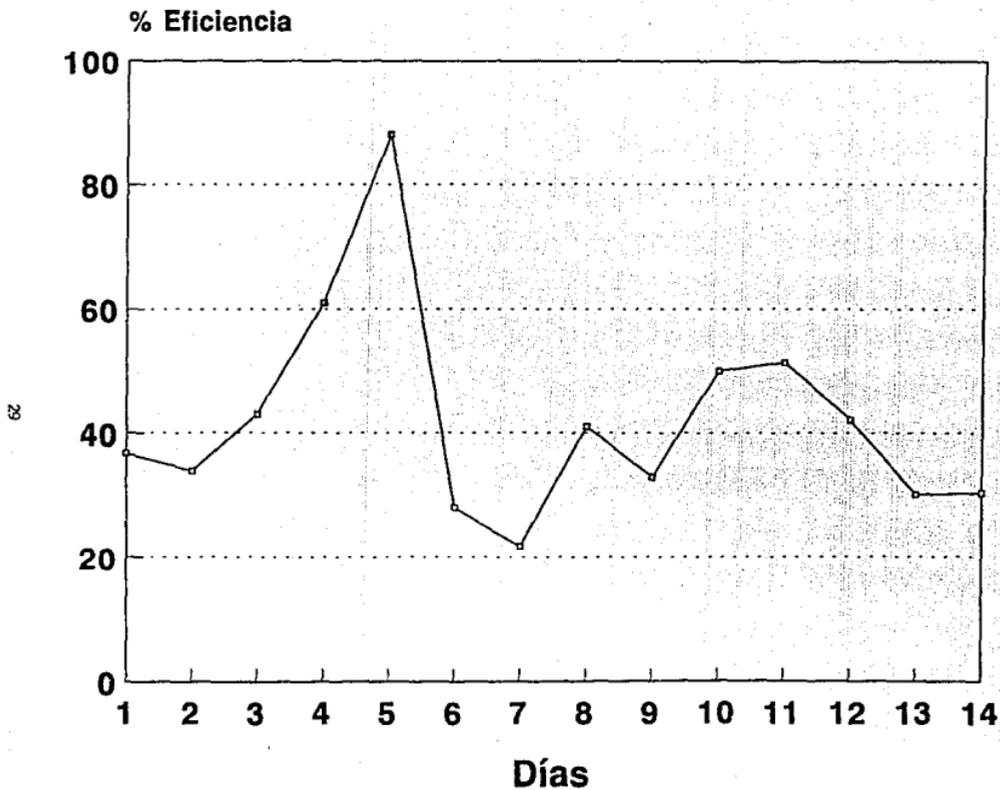
Los resultados en el comportamiento de la eficiencia de remoción de la DBO y DQO con respecto al tiempo obtenido en el modelo se presentan en la gráfica 1 y 2.

La gráfica 3 presenta el porcentaje de eficiencia en remoción de SST durante el periodo de operación del reactor. Los resultados obtenidos en los tres parámetros que se monitorearon en el experimento, demuestran que el proceso es adecuado para el tratamiento de aguas residuales domésticas, un mayor periodo de experimentación sería necesario para lograr una mejor adaptación de los microorganismos anaerobios y establecer una mejor correlación entre la eficiencia de remoción y el tiempo de retención en el reactor.

Tabla 15.- Valores del TRH del reactor anaerobio

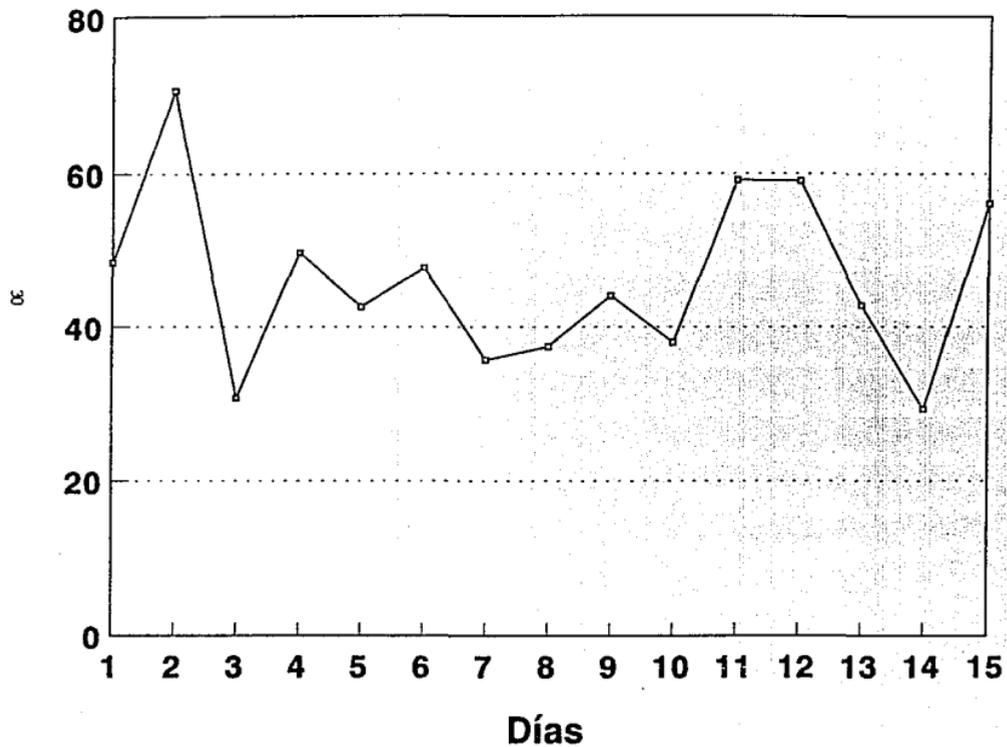
FECHA	GASTO ml/min	TRH horas	FECHA	GASTO ml/min.	TRH horas
011090	33	45.45	291290	53	28.30
041090	34	44.11	301290	55	27.54
121090	27	55.55	311290	52	28.85
181090	30	50.00	020191	50	30.00
191090	32	46.88	030191	50	30.00
201090	35	42.85	040191	50	30.00
211090	30	50.00	050191	50	30.00
221090	31	48.38	060191	50	30.00
271090	33	45.45	070191	50	30.00
161190	30	50.00	080191	55	27.27
171190	26	58.14	090191	52	28.85
181190	32	46.88	110191	55	27.54
191190	35	43.47	120191	63	23.81
201190	30	50.87	150191	77	19.48
211190	33	45.45	160191	68	22.05
221190	35	42.85	170191	79	18.98
231190	37	41.10	180191	77	19.48
281190	30	50.00	200191	75	20.00
291190	32	46.88	210191	76	19.73
031290	33	46.15	230191	75	20.00
041290	32	46.88	240191	100	15.00
051290	33	45.45	250191	102	14.70
071290	33	45.45	260191	102	14.70
081290	37	40.54	270191	108	13.88
101290	35	42.85	290191	105	14.29
111290	36	41.90	300191	104	14.42
141290	24	62.50	310191	108	13.88
181290	37	40.54	010291	100	15.00
191290	35	42.85	020291	100	15.00
201290	37	40.54	030291	100	15.00
231290	33	45.45	040291	100	15.00
241290	53	28.30	080291	100	15.00
261290	55	27.52	110291	100	15.00
271290	55	27.27	150291	103	14.56

Gráfica 1. Porcentaje de eficiencia en remoción de DQO

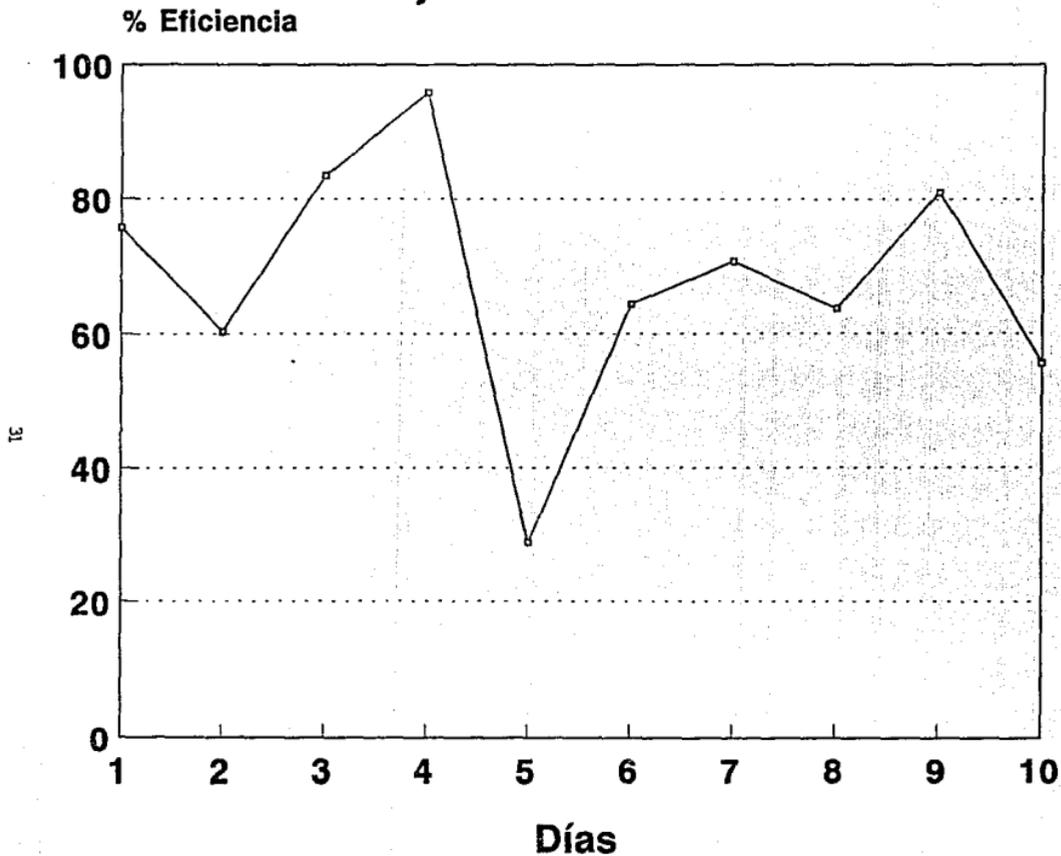


Gráfica 2. Porcentaje de eficiencia en remoción de DBO

% Eficiencia



Gráfica 3. Porcentaje de eficiencia en remoción de SST



3 DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

3.1 ESTUDIOS PRELIMINARES DE LA POBLACION

La población que nos ocupa, es un conjunto habitacional que corresponde a una población de clase media y con 200 casas y se estima una cantidad de 5 personas por casa, lo que da una población de 1000 habitantes. Esta población se considera la máxima porque no existe posibilidad de ampliaciones para futuras construcciones.

La dotación de agua se estima en 150 lt/hab./día .

Calculo del gasto medio: Qmed.

Qmed= Dotación x Población

$$Qmed = 150 \times 1000 = 0.0017 \text{ m}^3/\text{s} = 1.7 \text{ l/s}$$

Utilizando el coeficiente de Hammon obtenemos el gasto máximo: Qmax

$$Qmax = Qmed \left(1 + \frac{14}{4 + \sqrt{P}} \right) \quad P = \text{población en miles}$$

$$Qmax = 1.7 \times 3.8 = 6.4 \text{ l/s}$$

Cálculo del gasto en tiempo de lluvia: Qp

Qp= CeTrAc donde: Ce coeficiente de escorrentía 0.9
Tr lámina de precipitación diaria 50mm
Ac área de la cuenca 8000 m²

$$Qp = 0.9 \times 0.05 \times 8000 = 360 \text{ m}^3/\text{día} = 4.16 \text{ l/s}$$

Qt=Qp+Qmed donde: Qt gasto total en tiempo de lluvias

$$Qt = 4.16 + 1.7 = 5.86 \text{ l/s}$$

Concentración de DBO en tiempo de lluvias: Ct

CtQt= QpCp+CmQmed donde: Ct concentración total de DBO
Cp concentración DBO de LLuvia=0
Cm concentración media DBO= 212 mg/l
de tabla 6.

$$Ct = \frac{QmedCm}{Qt}$$

$$Ct = \frac{1.7 \times 212}{5.86} = 61.5 \text{ mg/l}$$

Se concluye que cuando llueve hay una disminución en la carga de DBO por dilución.

Si se presenta la máxima escurrentia pluvial en tiempo de lluvia se tiene el gasto Qmm (máximomáximo): Qmm

$$Q_{mm} = Q_{max} + Q_p = (6.46 + 4.16) = 10.62 \text{ l/s}$$

Se propone el diseño del reactor para este gasto.

3.2 CALIDAD DEL AGUA

El efluente del reactor anaerobio es un agua con alto contenido de coliformes, que no permite utilizarse directamente en riego sin un tratamiento de desinfección, por lo que se sugiere clorar el efluente. La tendencia actual es la remoción de coliformes por medio de lagunas de estabilización, sin embargo en este caso el condominio no cuenta con terreno para su construcción, lo que deja como propuesta la cloración.

3.3 MEMORIA DE CALCULO

Datos de diseño.

Consideraciones generales:

Velocidad ascensional $0.3 \leq V_a \leq 1.5 \text{ m/h}$

Altura del reactor $H_t \geq 2 \text{ mt.}$

Tiempo de residencia hidráulica $3 \text{ hs.} \leq \text{TRHR} \leq 6 \text{ hs.}$

El flujo máximo de diseño será:

$$Q_{mm} = 10.62 \text{ l/s} \text{ ó } 38.23 \text{ m}^3/\text{hr}$$

Cálculo del Area del reactor: A

$$A = \frac{Q_{mm}}{V_a}$$

Qmm = Gasto máximo de diseño

A = Area del reactor

Va = Velocidad ascensional

Usando $V_a = 1.5 \text{ m/h}$ que es el límite máximo

$$A = \frac{38.23}{1.5} = 25.48 \text{ m}^2$$

Asumiendo y para reducir costos se propone cuadrado el reactor ver figura 5.

Proponiendo $A_1 = B_1$ y $C_1 = (A_1 + B_1)$

Area del reactor

$$\text{Area} = C_1(A_1 + B_1) = C_1(C_1) = C_1^2$$

Encontrando:

$$C_1 = \sqrt{25.45 \text{ m}^2} = 5.04 = 5.00$$

Como $A_1 + B_1 = 5$ $A_1 = 2.5$ $B_1 = 2.5$

Cálculo de la altura total del reactor: Ht

$$\text{TRHr} = \frac{V}{Q} = \frac{A \text{ Ht}}{Q}$$

TRHt = Tiempo de residencia hidráulico total

TRHs = Tiempo de residencia hidráulico sedimentador

TRHr = Tiempo de residencia hidráulico del reactor

$$\text{TRHt} = \text{TRHs} + \text{TRHr}$$

Proponemos al límite $\text{TRHr} = 3 \text{ hs.}$ porque es el gasto Q_{maxmax}
 $\text{TRHs} = 15 \text{ min.}$

$$\text{TRHt} = 3 \text{ hs.} + 15 \text{ min.} = 11700 \text{ seg.}$$

$$V = Q \text{ TRHt} = 10.62 \text{ l/seg} * 11700 \text{ seg} = 124.25 \text{ m}^3$$

$$\text{Ht} = V/A = 124.25 \text{ m}^3 / 25 \text{ m}^2 = 4.9 \text{ m}$$
 se acepta porque es $> 2 \text{ mts.}$

Cálculo de la altura del sedimentador: Hs

Area del triángulo

$$A_t = B_1 H_s / 2$$

Volúmen del sedimentador Vs

$$V_s = C_1 (B_1 H_s / 2)$$

$$V_s = Q \text{ TRHs} = 10.62 \text{ l/s} * 15 \text{ min.} = 159.3 \text{ min l/s} = 9558 \text{ l}$$

$$V_s = 9.55 \text{ m}^3$$

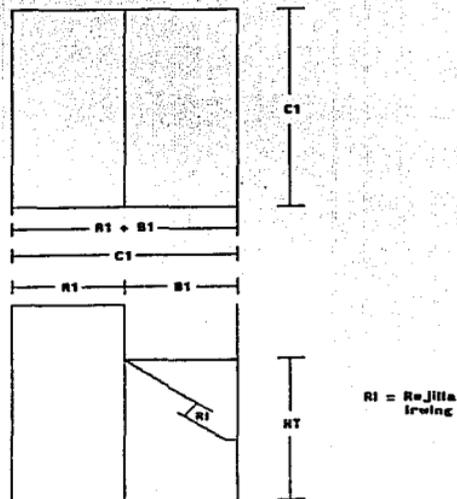


FIG. 5. ESQUEMA PARA DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR ANAEROBIO

Despejando Hs de $V_s = C_1(B_1H_s/2)$

$$H_s = \frac{V_s \times 2}{B_1 C_1} = \frac{9.55 \times 2}{2.5 \times 5.0} = 1.53 = 1.50 \text{ m}$$

Numero de toberas:

Se proponen 4 toberas por cada 9 m^2 de reactor.

Como se tienen 25.45 m^2 de área de reactor:

$$\text{Numero de toberas} = 25.45 \text{ m}^2 / 4 = 11 \text{ toberas}$$

La distribución de las toberas en el fondo del reactor se muestra en la fig. 6.

Cálculo de la cámara de gas: Hcg asumiendo una producción de 0.25 m^3 volumen/ m^2 reactor dato experimental de gas.

$$V_{cg} = 0.25 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \times 25 \text{ m}^2 = 6.25 \text{ m}^3$$

$$H_{cg} = \frac{6.25 \text{ m}^3}{2.5 \times 5.0} = 0.5 \text{ mts.}$$

Cálculo de la caja de entrada:

El número de toberas = 11 y se propone de 3 pulgadas, el ancho mínimo será:

12 espacios entre toberas de 5 cm cada uno $12 \times 5 = 60 \text{ cm}$.

11 tubos de 3 plg. $2.54 \times 3 \times 11 = 83 \text{ cm} = 90 \text{ cm}$.

Ancho mínimo $0.60 + 0.90 = 1.50 \text{ mts.}$

Cálculo de pérdidas por tubería:

De la relación e/d largo/diámetro de la tobera se calcula el valor de Cd coeficiente de descarga = 0.59

Utilizando la fórmula para orificio de pared delgada, despejando H de:

$$Q = C_d A \sqrt{2gH}$$

Donde Q = Gasto por tobera = $10.62/11$ toberas = 9.65×10^{-4}

Cd = Coeficiente de descarga = 0.59

A = Área de tobera = 0.01824 m^2

g = Aceleración de la gravedad = 9.81 m/s^2

H = Pérdida de carga

por lo tanto:

$$H = 9.31 \times 10^{-7} / 2.27 \times 10^{-3} = 0.0004 \text{ m}$$

Como las pérdidas por toberas son muy pequeñas se desprecian.

Cálculo de la altura de desplante de la canaleta:

Utilizando la fórmula general de un vertedero y despejando h de:

$$Q = \mu l h \sqrt{2gh}$$

Donde Q = Caudal en m³/s = 10.62
μ = Coeficiente de caudal del vertedero = 0.40
l = Longitud del umbral en m = 2.50
g = Aceleración de la gravedad en m/s² = 9.81
h = altura de lámina en m

por lo tanto:

$$h = (1.12 \times 10^{-4} / 19.62)^{1/3} = 0.05 \text{ m}$$

La canaleta se desplantará 5cm por debajo del nivel de piso terminado de la caja de entrada.

Las figuras 7 y 8 muestran la sección transversal y la planta del reactor propuesto.

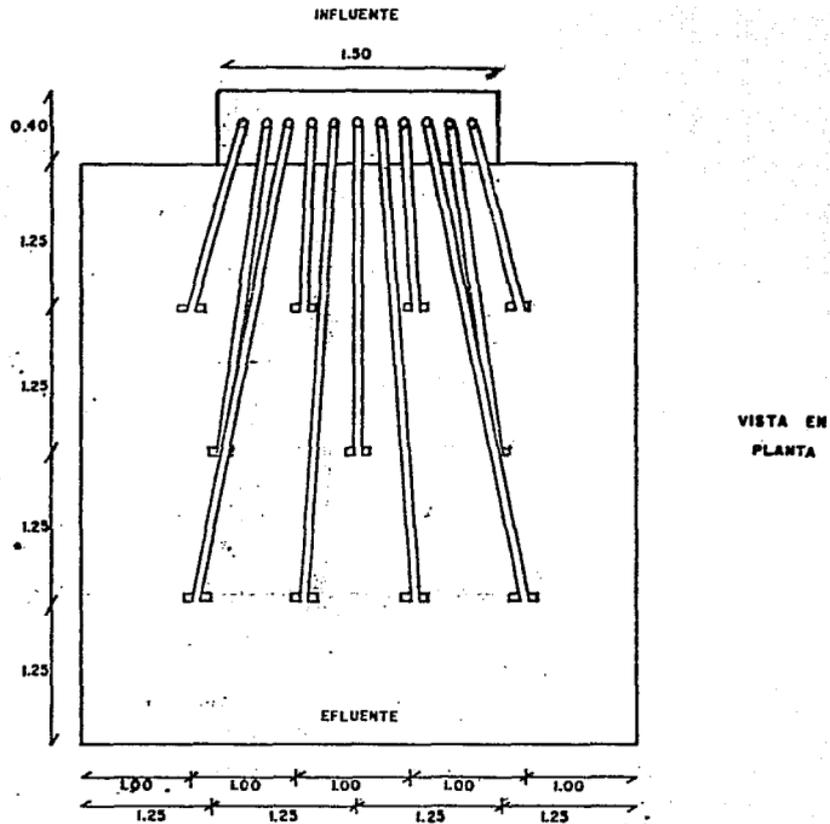


FIG. 6. DISTRIBUCION DE TOBERAS EN EL REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

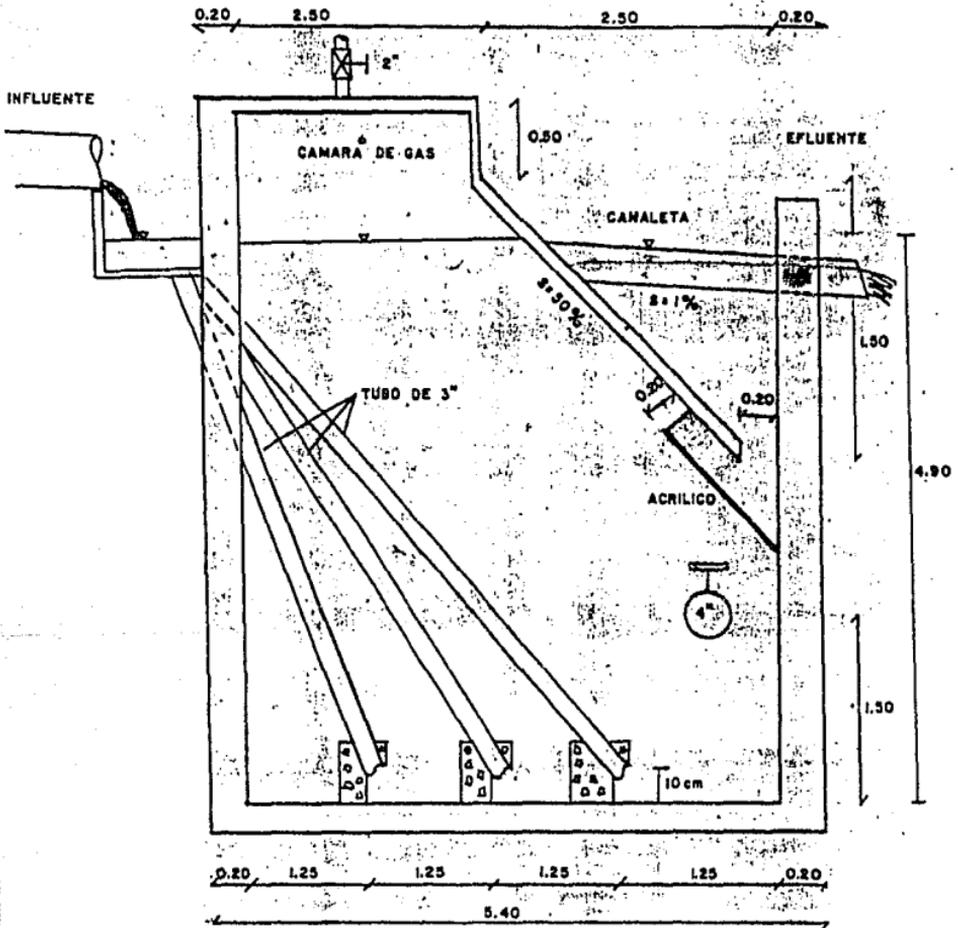


FIG. 7. VISTA TRANSVERSAL DEL REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE.

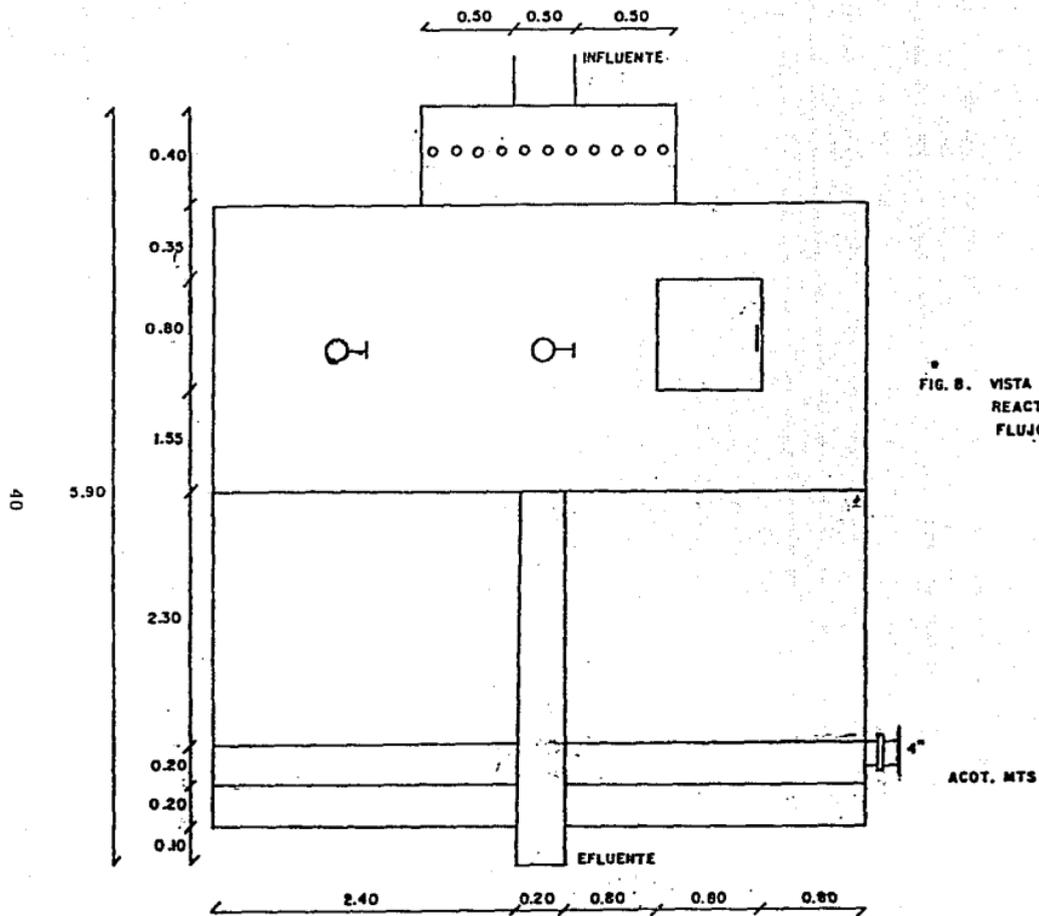


FIG. B. VISTA EN PLANTA DEL REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE.

4 RECOMENDACIONES PARA EL ARRANQUE, OPERACION Y MANTENIMIENTO

4.1 EQUIPAMIENTO PRELIMINAR Y PRUEBAS FINALES

Dentro de lo posible, se verificará la infiltración en los muros del reactor, determinando el porcentaje de pérdidas de líquido en base a mediciones afluente-efluente que puede ser evaluado durante un periodo de una semana, inspeccionando el terreno circundante con el objeto de detectar infiltraciones.

4.2 PUESTA EN MARCHA O ARRANQUE

La tabla 16 presenta una guía para la primera puesta en marcha o arranque del reactor anaerobio, y debe ser utilizada como guía tentativa.

Tabla.16 Guía para la primera puesta en marcha de un reactor anaerobio de flujo ascendente, utilizando lodo digerido como semilla (4).

-
- 1.- Cantidad de lodo sembrado: 10-15 kgSSV/m³ reactor.
 - 2.- Carga inicial : 0.05-0.1 kgDQO/kgSSV/día
 - 3.- No aumentar la carga hasta que los ácidos volátiles estén degradados en un 80 % ó más.
 - 4.- Permitir el lavado de los lodos voluminosos.
 - 5.- Retener la parte pesada del lodo.
-

Kooijman(4) menciona otro parámetro importante, no aumentar la carga orgánica hasta cuando la remoción de DQO este por encima del 65 % por 7 días consecutivos.

Entre los materiales que se pueden utilizar como inóculo para la puesta en marcha pueden ser: lodos de desagüe digerido, lodo de estiércol bobino digerido, contenido de tanques sépticos o lodos de lagunas anaerobias (4).

Existe la posibilidad de arranque del reactor sin semilla como inóculo.

4.3 OPERACION Y MANTENIMIENTO

La operación y mantenimiento del reactor anaerobio pretende ser lo más sencillo, representa una parte importante para el buen desempeño del reactor. A continuación se presentan las operaciones a realizar.

- Limpieza y recolección de sólidos atrapados por las rejillas en caso de existir.

- Aun cuando no se ha llegado a estudiar la eliminación de lodos en exceso, estos podrán ser evacuados a depósitos para que en ellos se realicen la digestión y mineralización de los mismos.
- Se efectuarán análisis de Demanda Química de Oxígeno, Sólidos Suspendidos Totales, Volátiles y Fijos, en el Influyente y Efluente de la planta, una vez por semana, por un período de 1 año para ver la eficiencia de remoción.
- Los lodos se purgaran cada año.

De mantenimiento se sugiere verificar que las tuberías se encuentren limpias.

5 BIBLIOGRAFIA

- 1.- Metcalf and Eddy. Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales. Editorial Labor, S.A. Segunda Edición. Barcelona 1985, p. 969.
- 2.- David A. Staffor, Dennis L. Hawkes, Rex Horton. Methane Production from Waste Organic Matter. C.R.C. Press, Inc. Boca Raton, Florida. 1980. p. 285.
- 3.- Lettinga, Gatzke. Conceptos Básicos del Proceso UASB. II Curso Seminario Nacional de Biogas. Lima, Perú. 17 al 21 de junio, 1985.
- 4.- Mansur Aisse, Miguel. Tratamientos de Desagües Domésticos en Reactores Anaerobios, de Flujo Ascendente, en Manto de Lodos. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima, Perú. Octubre 1985. p. 85.
- 5.- De Souza, Marcos Eduardo. Factores que influyen en la Digestión Anaerobia. Revista DAE. Vol. 44. No. 137. Junio de 1984. p. 88-94.
- 6.- Gracia Sancho, Josefina, Jacobo Gómez Lara. Soluciones y fenómenos ácido-base. Editorial Trillas, S.A. Primera Edición, México, 1980. p. 80.
- 7.- Arbolaez Orozco Javier. Tratamientos Anaerobios de Alta Tasa.
- 8.- Noyola Robles Adalberto. Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales, una experiencia de adaptación de tecnología en México.
- 9.- Guyot, Jean Pierre. Introducción a la Microbiología de los Digestores Anaerobios. Memorias Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales en América Latina. 8 y 9 de noviembre de 1990.
- 10.- Sotelo Avila Gilberto. Hidráulica General. Vol. 1. Fundamentos. Editorial Limusa. 1985.

CONCLUSIONES

- Se logró la formación de un inóculo a partir de lodo digerido, de una planta de tratamiento aerobia.
- El agua residual doméstica como sustrato puede ser tratada por el reactor anaerobio de flujo ascendente, con un porcentaje de remoción de 46 % de eficiencia en Demanda Bioquímica de Oxígeno, en promedio.
- La producción de gas es un índice de eficiencia en el proceso de digestión anaerobia, la calidad de flama que se produce depende de la cantidad y calidad de microorganismos anaerobios activos.
- El tiempo que se requiere para el arranque de un reactor anaerobio, es de cuando menos 6 meses, utilizando material de inóculo.

RECOMENDACIONES

- Se puede utilizar como inóculo lodo digerido de una planta de tratamiento aerobia.
- La cámara de gas debe ser pintada utilizando pintura epóxica, debido al desprendimiento de ácido sulfhídrico en los gases producidos por la digestión anaerobia, para evitar la corrosión del concreto.
- El reactor puede ser puesto en marcha sin inóculo.