



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA

**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA EL TRATAMIENTO
DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE UN
HOSPITAL.**

**TITULACION POR TESIS QUE PARA
OBTENER EL TITULO DE**

INGENIERO BIOTECNÓLOGO.

PRESENTA

CARLOS NOEL MORALES VELÁZQUEZ.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que creyeron y siguen creyendo en mi y que dejan una parte de su conocimiento y amistad. Agradezco a mi familia, amigos y compañeros por su apoyo en todo momento.

Le agradezco a mi madre Dora Alicia Velázquez que con sacrificios y desacuerdos me ha sacado adelante. También agradezco que mi tío Antonio Velázquez quien fue en eslabón para iniciarme en la relaciones laborales y partiendo de ese punto le agradezco a Pablo Fernández por darme la oportunidad de conocer a la que fue la asesora de este trabajo la doctora Mayra de la Torre a quien le tengo una admiración, además al gran equipo de trabajo con el que cuenta. También le agradezco al Centro de Investigación en Alimentos y Desarrollo por el apoyo económico y estancia brindada. Y un agradecimiento especial al doctor Francisco Cervantes por su apoyo brindado hacia este trabajo y por compartir su conocimiento conmigo y mis compañeros de la carrera.

RESUMEN

Se diseñó un sistema de tratamiento para aguas residuales provenientes de un hospital para disminuir la concentración de sus contaminantes y así cumplir con los límites máximos permitidos por la normatividad (NOM 003 ECOL 1997). Además de lo anterior evitará sanciones al hospital y permitirá reusar el agua tratada en el riego de áreas verdes y suelos, en el lavado de autos, etc. Para el diseño se consideró que una parte del hospital está en operación y otra en construcción. Se monitoreó el gasto de agua por 12 días (parte en operación), el gasto promedio fue de 90.38 m³/día y el máximo de 125 m³/día. Para la parte en construcción se calculó el gasto teórico para 102 camas y 316 empleados y fue de 68.74 m³/día, se consideró una capacidad de planta de 200 m³/día. Se caracterizó el agua residual durante cuatro días (20, 27 junio; 4, 11 julio) y los análisis mostraron que algunos contaminantes (DBO 321.15 mg/l, SST 119.85 mg/l, coliformes 31,008,333 NMP/100ml) rebasaron la concentración máximo permisible establecidos (NOM 003 ECOL 1997). El sistema de tratamiento diseñado, se integró por un cárcamo de bombeo, reactores biológicos (anaerobio tipo UASB y lodos activados), sedimentador, clorador y filtro multimedia, el diseño de estos equipos se basó en criterios establecidos por la literatura especializada para cada uno de ellos.

La eficiencia teórica de remoción del sistema de tratamiento diseñado fue de 94% para la DBO, 93% para SST, y 99% para patógenos. La concentración teórica esperada para DBO 19.1 mg/l, SST 8.38 mg/l y coliformes 240 NMP/100ml. Medir el gasto y caracterizar el agua residual ayuda a diseñar el sistema de tratamiento adecuado a las características especiales de las aguas residuales de un hospital.

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| AGRADECIMIENTOS. | i |
| RESUMEN. | ii |
| ÍNDICE. | iii |
| LISTA DE TABLAS Y FIGURAS. | v |
| | |
| I. INTRODUCCIÓN. | 1 |
| 1.1 Justificación. | 2 |
| 1.2 Planteamiento del problema. | 2 |
| 1.3 Hipótesis. | 2 |
| 1.4 Objetivo. | 2 |
| 1.4.1 Objetivos específicos. | 3 |
| | |
| II. MARCO TEÓRICO. | 4 |
| 2.1 Definición de aguas residuales. | 4 |
| 2.2 Origen de las aguas residuales. | 4 |
| 2.3 Componentes de las aguas residuales. | 5 |
| 2.4 Caracterización del agua residual. | 6 |
| 2.5 Contaminantes de importancia en el tratamiento de aguas residuales. | 6 |
| 2.6 Aguas residuales de hospitales. | 8 |
| 2.7 Tratamientos para aguas residuales. | 9 |
| 2.8 Operaciones unitarias comúnmente utilizadas. | 11 |
| 2.8.1 Sedimentación. | 11 |
| 2.8.2 Lodos activados. | 11 |
| 2.8.3 Procesos anaerobios. | 11 |
| 2.8.4 Desinfección. | 12 |
| 2.9 Consideraciones generales para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales. | 13 |
| 2.10 Normas Oficiales Mexicanas. | 14 |

| | |
|--|----|
| III. MATERIALES Y MÉTODOS. | 17 |
| 3.1 Estimación del gasto de agua. | 17 |
| 3.2 Caracterización del agua residual. | 17 |
| 3.3 Filosofía de operación del sistema de tratamiento. | 18 |
| 3.4 Diseño de equipo. | 19 |
| IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN. | 20 |
| 4.1 Estimación del gasto de agua. | 20 |
| 4.2 Caracterización del agua residual. | 21 |
| 4.3 Diseño de equipo. | 26 |
| 4.4 Cárcamo de bombeo. | 26 |
| 4.5 Reactores biológicos. | 27 |
| 4.6 Reactor UASB. | 27 |
| 4.7 Lodos activados. | 30 |
| 4.8 Sedimentador. | 36 |
| 4.9 Clorador. | 37 |
| 4.10 Filtro multimedia. | 39 |
| 4.11 Alcance general del sistema. | 39 |
| V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. | 40 |
| VI. LITERATURA CITADA. | 42 |

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Contaminantes de importancia en el tratamiento del agua residual. | 7 |
| Tabla 2. Comparación de agua residual municipal con efluentes hospitalarios. | 9 |
| Tabla 3. Agentes infecciosos potenciales presentes en el agua residual. | 12 |
| Tabla 4. Concentraciones máximas permisibles por la NOM 001 ECOL. | 14 |
| Tabla 5. Límites máximos permisibles por la NOM 002 ECOL. | 15 |
| Tabla 6. Límites máximos permisibles establecidos por la NOM 003 ECOL. | 16 |
| Tabla 7. Valores Típicos de Consumo. | 17 |
| Tabla 8. Consumo diario acumulado de agua (expresado en m ³). | 20 |
| Tabla 9. Caracterización del agua residual. | 22 |
| Tabla 10. Coliformes fecales. | 23 |
| Tabla 11. Contenido de grasas y aceites. | 23 |
| Tabla 12. Temperatura y pH. | 24 |
| Tabla 13. Contaminantes del agua residual que no cumplen con la concentración requerida por las NOM's. | 24 |
| Tabla 14. Estimación del cárcamo de bombeo. | 26 |
| Tabla 15. Eficiencia, criterios de diseño y constantes cinéticas para reactores de lodos activados completamente mezclado. | 31 |
| Tabla 16. Bases de diseño para el cálculo de la eficiencia de transferencia operativa. | 35 |
| Tabla 17. Concentración teórica final de DBO, SST y coliformes. | 39 |
| Figura 1. Origen de las aguas residuales híbridas de los hospitales. | 8 |
| Figura 2. Tren de tratamiento. | 25 |
| Figura 3. Clorador. | 38 |

I INTRODUCCIÓN

Los Hospitales son instituciones de servicio público que se desarrollan en zonas con cierta densidad urbana y generalmente cuentan con espacio para el crecimiento de nuevas áreas, tanto en aquellas sustantivas a su propia función como en las de servicio.

En los hospitales se llevan a cabo actividades para el mantenimiento y cuidado del inmueble y de los pacientes, algunas de estas actividades generan efluentes cargados de materia orgánica, sólidos suspendidos, heces, agentes patógenos, desechos líquidos peligrosos, productos biológicos, químicos vencidos, desechos radiactivos, residuos de blanqueadores, detergentes y suavizantes; además, se utilizan una amplia variedad de productos farmacéuticos, reactivos químicos y sustancias desinfectantes. Algunos de estos desechos se mezclan y llegan a formar parte de los efluentes de aguas residuales de los hospitales que son descargados directamente al alcantarillado municipal y otras fuentes receptoras.

Por otra parte, la necesidad de que los efluentes de los hospitales, que son vertidos al alcantarillado público, cumplan con los requerimientos de calidad, implica el planteamiento de estrategias que permitan salvar esa situación mediante un sistema de tratamiento de aguas residuales previo a las descarga al alcantarillado.

Para llevar a cabo el diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales, se deben de considerar conceptos como planeación, evaluación, diseño, construcción, operación y mantenimiento del sistema de tratamiento de aguas residuales, y requerimientos normativos. (Metcalf & Eddy, 1991)

1.2 Justificación.

Los hospitales deben de contar con instalaciones de tratamiento de aguas residuales que les permitan cumplir con las normas que regulan la calidad del agua para su descarga al alcantarillado público o para su reuso.

1.2 Planteamiento del problema.

Las aguas residuales con alta carga de contaminantes que son vertidas al alcantarillado público, tienen un impacto en el medio ambiente y la salud humana. Por ello es necesario contar con instalaciones para aplicar un tratamiento a las aguas residuales antes de ser descargadas al alcantarillado público, para disminuir en gran medida la concentración de sus contaminantes y así reducir estos impactos, además de cumplir con los requerimientos de las normas oficiales y evitar sanciones.

1.3 Hipótesis.

Es factible diseñar un tren de tratamiento para las aguas residuales adecuado a las características inherentes del efluente de un hospital público para reusar el agua tratada en el riego de áreas verdes.

1.4 Objetivo.

Diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales, que mejore la calidad de éstas con la finalidad de que cumplan con la normatividad vigente.

1.4.1 Objetivos específicos.

- a. Medir los gastos de agua de un hospital durante distintos días y en diferentes horarios.
- b. Caracterizar el agua residual generada de un hospital.
- c. Seleccionar las normas mexicanas que aplican para la descarga al sistema de drenaje y para reuso de aguas residuales.
- d. Formular el tren de tratamiento de aguas residuales que permita la funcionalidad del mismo.
- e. Elaborar las bases de diseño para un sistema de tratamiento de aguas residuales.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Definición de aguas residuales.

Las aguas residuales son aquellas que al haber sido usadas portan materiales derivados de residuos domésticos, comerciales o de procesos industriales, las cuales por razones de salud pública y por consideraciones de recreación, económicas y estéticas, no pueden desecharse vertiéndolas sin tratamiento en el sistema de alcantarillado o corrientes convencionales. (ANAM, 2003)

2.2 Origen de los caudales de aguas residuales.

La determinación del origen de los caudales de aguas residuales es fundamental a la hora de proyectar las instalaciones de colección, tratamiento y vertido. El origen de los caudales de las aguas residuales depende del tipo de sistema de colección que se emplee y puede incluir los siguientes:

- a. Agua residual doméstica. Es aquella procedente de zonas residenciales o instalaciones comerciales, públicas y similares.
- b. Agua residual industrial. Son aguas residuales en las cuales predominan vertidos industriales.
- c. Infiltración y aportaciones incontroladas. La infiltración hace referencia al agua que penetra en la red de alcantarillado a través de juntas defectuosas, fracturas y grietas o paredes porosas. Las aportaciones incontroladas corresponden a aguas pluviales que descargan en la alcantarilla, drenes de cimentaciones, bajantes de edificio y tapas de pozo de registro.
- d. Aguas pluviales.

Es preciso tener datos fiables sobre los caudales que se requiere tratar. En aquellos casos en los que los datos sobre caudales sean escasos o inexistentes, éstos pueden ser estimados partiendo de otras fuentes de información que guarden estrecha relación con los mismos, como puede ser el caso de los datos sobre consumo de agua.

Para las instituciones de servicio como los hospitales, existen criterios que se pueden considerar cuando los datos sobre caudales son escasos o inexistentes. El agua que consumen en los hospitales se estima normalmente con base en alguna medida del tamaño y el servicio que se presta, como puede ser el volumen de agua que consumen cierto número de empleados y el número de camas existentes. Con conocimiento de esos datos se puede estimar el consumo de agua y posteriormente el caudal. (Metcalf & Eddy, 1996)

2.3 Componentes de las aguas residuales.

Las aguas residuales se caracterizan por su composición física, química y biológica.

- a. Características físicas. Las más importantes son el contenido total de sólidos (término que engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta). Otras características físicas importantes son el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad.
- b. Características químicas. En el estudio de las características químicas de las aguas residuales se aborda la medición de materia orgánica, materia inorgánica y gases presentes en el agua residual. Estas características son de importancia en la gestión de la calidad del agua y en el diseño de las instalaciones de tratamiento de aguas.
- c. Características biológicas. Se debe tener conocimiento de aquellos microorganismos que intervienen en tratamientos biológicos, organismos patógenos presentes en las aguas residuales, organismos usados como

indicadores de contaminación y su importancia, además de conocer los métodos empleados para determinar los organismos indicadores y conocer los métodos empleados para determinar la toxicidad de las aguas tratadas. (Metcalf & Eddy, 1996)

2.4 Caracterización del agua residual.

Los estudios que se realizan para la caracterización del efluente están encaminados a determinar las características físicas, químicas y biológicas del mismo, las concentraciones de los contaminantes y los medios óptimos para reducir las concentraciones de los mismos.

Para la caracterización del agua residual se emplean métodos de análisis cuantitativos y cualitativos. Los métodos cuantitativos pueden ser gravimétricos, volumétricos o fisicoquímicos. Estos últimos se utilizan para determinar parámetros no relacionados con las propiedades másicas o volumétricas del agua, e incluyen métodos instrumentales como la turbidimetría, colorimetría, potenciometría, espectrometría de absorción, entre otras. (Metcalf & Eddy, 1996)

2.5 Contaminantes de importancia en el tratamiento de aguas residuales.

Cuando se pretende tratar un agua residual, las exigencias normativas se basan en contenidos de materia orgánica, sólidos en suspensión y patógenos en el agua residual, además incluyen la eliminación de compuestos orgánicos refractarios, metales pesados y en algunos casos sólidos inorgánicos disueltos.

En la Tabla 1 se muestran los contaminantes de importancia en el tratamiento de aguas residuales.

Tabla 1. Contaminantes de importancia en el tratamiento de aguas residuales.

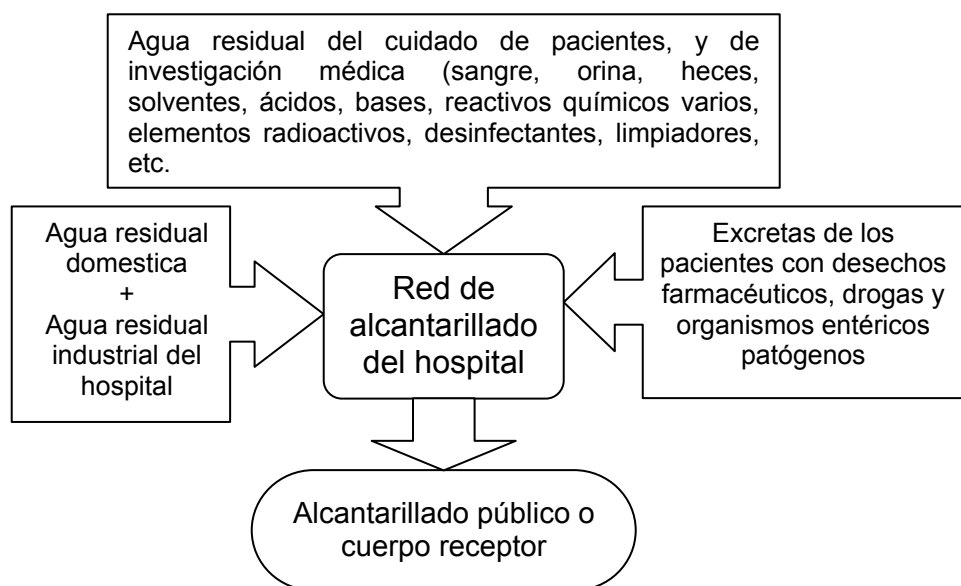
| Contaminantes. | Razón de la importancia. |
|---------------------------------|--|
| Sólidos en suspensión (SS). | Los sólidos en suspensión pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierten al agua residual sin tratar. |
| Materia orgánica biodegradable. | Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas animales, etc. La materia orgánica biodegradable se mide, en la mayoría de las ocasiones, en función de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y de la demanda química de oxígeno (DQO). |
| Patógenos. | Pueden transmitirse enfermedades contagiosas por medio de los organismos patógenos presentes en el agua residual. |
| Nutrientes. | Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten al entorno acuático, estos nutrientes pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada. |
| Contaminantes prioritarios. | Son compuestos orgánicos o inorgánicos determinados en base a su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad conocida o sospechada. |
| Materia orgánica refractaria. | Esta materia orgánica tiende a resistir a los métodos convencionales de tratamiento. Ejemplos típicos son los agentes tensoactivos, los fenoles y los plaguicidas agrícolas. |
| Metales pesados. | Los metales pesados son, frecuentemente, añadidos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales, y puede ser necesario eliminarlos si se pretende reutilizar el agua residual. |
| Sólidos inorgánicos disueltos. | Los constituyentes inorgánicos tales como calcio, sodio, y los sulfatos se añaden al agua de suministro como consecuencia del uso del agua, y es posible que se deban eliminar si se va a reutilizar el agua residual. |

Fuente: Metcalf & Eddy, 1991.

2.6 Aguas residuales de hospitales.

Debido a la variedad de actividades, en los hospitales se generan aguas residuales de carácter híbrido, con características domésticas, industriales y efluentes de cuidados de pacientes e investigación médica (Figura 1).

Figura 1. Origen de las aguas residuales híbridas de los hospitales.



Entre los principales aportes a las aguas residuales, asociados específicamente a la actividad hospitalaria se encuentran los siguientes:

- a. Microorganismos patógenos.
- b. Productos químicos peligrosos.
- c. Medicamentos.
- d. Isótopos radioactivos.
- e. Reveladores y fijadores fotográficos.
- f. Solventes.
- g. Pinturas y desechos de construcción.

Con base en esta información, la autoridad nacional del medio ambiente (ANAM, 2003) comparó las concentraciones promedio obtenidas para efluentes hospitalarios con los valores atribuidos a un agua residual media. Esta comparación permite apreciar el mayor contenido de contaminantes de los efluentes hospitalarios (Tabla 2).

Tabla 2. Comparación de agua residual municipal con efluentes hospitalarios.

| Contaminantes | Unidad | Efluentes municipales | Efluentes hospitalarios |
|--|--------|-----------------------|-------------------------|
| Sólidos suspendidos | mg/l | 300 | 225 |
| Demanda bioquímica de oxígeno DBO ₅ | mg/l | 220 | 603 |
| Carbono orgánico total COT | mg/l | 60 | 211 |
| Demanda química de oxígeno DQO | mg/l | 500 | 855 |
| Relación DQO/DBO ₅ | mg/l | 2.26 | 1.46 |
| Fósforo total | mg/l | 8 | 8.80 |
| Cloruros | mg/l | 50 | 133 |

Fuente: ANAM, 2003.

2.7 Tratamientos para aguas residuales.

Los tratamientos de aguas residuales se pueden clasificar en tratamientos primarios, secundarios y terciarios. En todos los casos se incluye un pre-tratamiento para evitar problemas de operación o mantenimiento en el sistema. Esta clasificación ayuda a establecer la secuencia de tratamiento para el diseño de un sistema de tratamiento, colocando estratégicamente cada proceso de tratamiento para remover la mayor cantidad de contaminantes del efluente y para preservar la integridad del sistema. (Ramalho, 1996)

Cada tratamiento puede incluir varios procesos, usualmente llamados procesos unitarios. (Metcalf & Eddy, 1991). El empleo de uno u otro de estos procesos unitarios depende de los objetivos del sistema de tratamiento, del costo de operación

y mantenimiento, y de las exigencias de las normas oficiales que regulan la calidad del agua residual. (Ramalho, 1996)

A continuación se describen los tratamientos empleados en los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

- a. Tratamientos primarios: incluyen el cribado o desbrozo, la sedimentación, flotación, neutralización y homogenización, y tienen por objeto la remoción por medio físicos de una porción de los sólidos suspendidos y materia orgánica del agua residual.
- b. Primario avanzado: es la remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica del agua residual, mediante floculación o filtración.
- c. Tratamiento secundario: son todos los procesos biológicos donde se lleva a cabo la remoción de la materia orgánica biodegradable (en solución y suspensión) y sólidos suspendidos. Algunos ejemplos pueden ser los procesos de lodos activados y los sistemas UASB que por sus siglas en inglés “upward-flow anaerobic sludge bed” y EGSB que por sus siglas en inglés “Expanded granular sludge bed”. La desinfección (remoción de patógenos) comienza en el tratamiento secundario.
- d. Tratamiento secundario con remoción de nutrientes: remoción de orgánicos biodegradables, sólidos suspendidos y nutrientes (nitrógeno, fósforo, o ambos).
- e. Tratamiento terciario: para la remoción de residuos sólidos suspendidos (después del tratamiento secundario), algunos ejemplos de tratamientos terciarios son la separación de sólidos en suspensión, la absorción por carbón activado, oxidación química (cloración y ozonación). También la desinfección y la remoción de nutrientes se llevan a cabo en el tratamiento terciario.
- f. Tratamiento avanzado: remoción del material disuelto y suspendido restante después del tratamiento biológico normal, para la reutilización del agua. (Metcalf & Eddy, 2003. Ramalho, 1996)

2.8 Operaciones unitarias comúnmente utilizadas.

Sedimentación. Es una de las operaciones unitarias más utilizadas en el tratamiento de las aguas residuales, consiste en la separación por gravedad de las partículas más pesadas que se encuentran en el agua. Su propósito fundamental es obtener un efluente clarificado. (Gutiérrez y Bueno, 2003)

Lodos activados. Es un proceso de tratamiento en el cual el agua residual y el lodo biológico (microorganismos) son mezclados y aireados en un tanque, los flóculos biológicos formados en este proceso se sedimentan en un tanque de sedimentación, lugar del cual son recirculados nuevamente al tanque de aireación. (Buitrón, et al. 2006)

En el proceso de lodos activados, la mezcla o agitación de los microorganismos y el agua residual se efectúan por medios neumáticos (aireadores superficiales, sopladores, etc.) y mecánicos (agitadores de paletas sumergidos o de superficie, impelentes, propélas), los cuales además del mezclado contribuyen a la transferencia de oxígeno.

El pase de burbujas de aire a través de las aguas de desecho coagula los coloides y la grasa, suministra oxígeno a los microorganismos para la degradación de parte de la DBO, y reduce un poco el nitrógeno amoniacal. (Ramalho, 1996; anonimo, 1996)

Sistemas anaerobios. Se toma como ejemplo a los reactores UASB los cuales son reactores anaerobios de flujo ascendente empleados para la remoción de los contaminantes orgánicos, los cuales son convertidos en gas metano y CO₂ principalmente, la mezcla de estos gases se conoce como "biogás". Los responsables de este proceso son los microorganismos anaerobios que se encuentran en una cama de lodo compuesta de gránulos.

El movimiento ascendente de las burbujas de biogás causa la turbulencia hidráulica y por ende el mezclado sin necesidad de piezas mecánicas. En la tapa del reactor, la fase acuosa se separa de los sólidos y del gas, mediante un separador trifásico. (Field y Sierra, 2005)

Desinfección. Es la desactivación o destrucción de los organismos patógenos para prevenir la dispersión de enfermedades transmitidas a través del agua. El cloro es el desinfectante más usado para el tratamiento del agua residual doméstica, porque destruye los organismos mediante la oxidación del material celular. (EPA, 1999)

La Tabla 3 muestra los microorganismos que comúnmente se encuentran en aguas residuales domésticas y las enfermedades asociadas a ellos. La eficacia de la desinfección depende de la susceptibilidad de los organismos a ser tratados. (Boner y Weston, 1999)

Tabla 3. Agentes infecciosos potenciales presentes en las aguas residuales.

| Organismo. | Enfermedad que causa. | Organismo. | Enfermedad que causa. |
|--------------------------------|--|--------------------------------------|--------------------------------|
| Bacterias. | | Bacterias. | |
| <i>Escherichia coli.</i> | Gastroenteritis. | <i>Leptospira (spp).</i> | Leptospirosis. |
| <i>Salmonella thypi.</i> | Fiebre tifoidea. | <i>Salmonella (2,100 serotipos).</i> | Salmonelosis. |
| <i>Shigella (4 spp)</i> | Shigellosis (disentería bacilar). | <i>Vibrio cholerae.</i> | Cólera. |
| Protozoos. | | Protozoos. | |
| <i>Balantidium coli.</i> | Balantidiasis. | <i>Cryptosporidium parvum.</i> | Cryptosporidiasis. |
| <i>Entamoeba histolytica</i> | Amebiasis (disentería amoébrica) | <i>Giardia lamblia</i> | Giardiasis. |
| Helmintos. | | Helmintos. | |
| <i>Ascaris lumbricoides.</i> | Ascariasis. | <i>T. solium.</i> | Teniasis. |
| <i>Trichuris trichiura.</i> | Tricuriasis. | | |
| Virus. | | Virus. | |
| <i>Enterovirus (72 tipos).</i> | Gastroenteritis, anomalías del corazón y meningitis. | <i>Hepatitis A.</i> | Hepatitis del tipo infeccioso. |
| <i>Agente de Norwalk.</i> | Gastroenteritis. | | |

Fuente: Boner y Weston; 1999.

2.9 Consideraciones generales para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

El proceso de análisis, selección y posterior diseño del sistema de tratamiento, incluye una serie de evaluaciones que varían dependiendo de la complejidad del proceso de tratamiento, y para ello se consideran factores entre los que se incluyen: (Ramalho, 1996; Anónimo1996)

- a. Características del agua residual a tratar: DBO, materia en suspensión, pH, productos tóxicos.
- b. El impacto que tendrán las variaciones del efluente de agua residual sobre el proceso de tratamiento.
- c. Calidad del efluente de salida requerido.
- d. Proceso de selección de tratamiento basado en una relación empírica o criterios establecidos.
- e. Coste y disponibilidad de terrenos.
- f. Consideración de las futuras ampliaciones o la previsión de límites de calidad de vertidos más estrictos que necesiten el diseño de tratamientos más sofisticados en el futuro.
- g. Requerimiento de energía.
- h. Operación y mantenimiento.
- i. Coste local del agua.

Una vez diseñado el sistema de tratamiento, se consideran aspectos relacionados con la ubicación y construcción del sistema de tratamiento.

- a. Selección de sitio.
- b. Consideraciones estéticas.
- c. Consideraciones topográficas.
- d. Consideraciones geológicas e hidrogeológicas.
- e. Consideraciones atmosféricas. (Engineer manual 1110-2-501, 1999)

2.10 Normas Oficiales Mexicanas.

En México la calidad de los efluentes de aguas residuales es regulada por las normas oficiales mexicanas:

- a. NOM 001 ECOL 1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Esta norma toma en cuenta a los contaminantes básicos del agua residual como son: grasas y aceites, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno total, fósforo total, materia flotante y la temperatura. Además, especifica las concentraciones de contaminantes como los metales pesados y cianuros (Tabla 4).

Tabla 4. Concentraciones máximas permisibles permitidos por la NOM 001 ECOL.

| LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BASICOS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------------|-----|--------------------|-----|-----------------------------------|----|-----------------------|-----|--------------------|----|-----------------------------------|-----|------------|-----|-----------|-----|-----------------------|----|---------------------|-----|----|
| PARAMETROS (miligramos por litro excepto donde especifique) | RIOS | | | | EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES | | | | AGUAS COSTERAS | | | | SUELOS | | | | | | | | |
| | Uso en riego agrícola | | Uso publico urbano | | Protección de vida acuática | | Uso en riego agrícola | | Uso publico urbano | | Explotación pesquera y navegación | | Recreación | | Estuarios | | Uso en riego agrícola | | Humedales naturales | | |
| | PM | PD | PM | PD | PM | PD | PM | PD | PM | PD | PM | PD | PM | PD | PM | PD | PM | PD | PM | PD | |
| Temp. °C | NA | NA | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | NA | NA | 40 | 40 |
| Grasas y aceites | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | 25 | 15 | 25 | |
| Materia flotante | A | U | S | E | N | C | I | A | U | S | E | N | C | I | A | U | S | E | N | C | |
| Sólidos sedimentables ml/l | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | NA | NA | 1 | 2 | |
| SST | 150 | 200 | 75 | 125 | 40 | 60 | 75 | 125 | 40 | 60 | 150 | 200 | 75 | 125 | 75 | 125 | NA | NA | 75 | 125 | |
| DBO | 150 | 200 | 75 | 150 | 30 | 60 | 75 | 150 | 30 | 60 | 150 | 200 | 75 | 150 | 75 | 150 | NA | NA | 75 | 150 | |
| Nitrógeno | 40 | 60 | 40 | 60 | 15 | 25 | 40 | 60 | 15 | 25 | NA | NA | NA | NA | 15 | 25 | NA | NA | NA | NA | |
| Fósforo | 20 | 30 | 20 | 30 | 5 | 10 | 20 | 30 | 5 | 10 | NA | NA | NA | NA | 5 | 10 | NA | NA | NA | NA | |

PM = Promedio mensual.

PD = Promedio diario.

NA = No aplica.

- b. NOM 002 ECOL 1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillados urbano o municipal (Tabla 5). Esta norma solamente reduce los

límites permisibles de los contaminantes como son los metales pesados, sólidos sedimentables y el contenido de grasas y aceites de la NOM 001 ECOL. Las concentraciones permitidas para el resto de los contaminantes denominados como básicos por la NOM 001 ECOL permanecen tal cual.

- c. NOM 003 ECOL 1997. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales tratadas que se reusen en servicio al público. La ventaja de cumplir con esta norma es que se puede reutilizar el agua tratada y de esa manera reducir el consumo de agua potable. Esta norma se respalda de la NOM 001 ECOL. Los contaminantes y las concentraciones en que se deben de encontrar las descargas del agua residual tratada se muestran en la Tabla 6.

Tabla 5. Límites máximos permisibles por la NOM 002 ECOL.

| LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES | | | |
|--|------------------|-----------------|-------------|
| PARAMETROS (mg/l excepto cuando especifique) | Promedio mensual | Promedio diario | Instantáneo |
| Grasas y aceites | 50 | 75 | 100 |
| Sólidos sedimentables ml/l | 5 | 7.5 | 10 |
| Arsénico total | 0.5 | 0.7.5 | 1 |
| Cadmio total | 0.5 | 0.75 | 1 |
| Cianuro total | 1 | 1.5 | 2 |
| Cobre total | 10 | 15 | 20 |
| Cromo hexavalente | 0.5 | 0.75 | 1 |
| Mercurio total | 0.01 | 0.015 | 0.02 |
| Níquel total | 4 | 6 | 8 |
| Plomo total | 1 | 1.5 | 2 |
| Zinc total | 6 | 9 | 12 |

Tabla 6. Límites máximos permisibles establecidos por la NOM 003 ECOL.

| TIPO DE REUSO | PROMEDIO MENSUAL | | | | |
|--|-------------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|----------|
| | Coliformes fecales NMP/100 ml | Huevos de Helminto (h/l) | Grasas y aceites mg/l | DBO ₅ mg/l | SST mg/l |
| Servicio al público con contacto directo | 240 | ≤ 1 | 15 | 20 | 20 |
| Servicio al público con contacto directo u ocasional | 1,000 | ≤ 5 | 15 | 30 | 30 |

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Estimación del gasto de agua.

Se consideró que una parte del hospital está en operación y la otra en construcción. Por lo tanto para estimar el gasto de agua, se midió el consumo de agua del hospital en operación, para lo cual se tomaron lecturas del medidor de consumo cada 3 horas por 12 días. Este gasto se comparó con el gasto teórico estimado con base al número de camas (167) y de empleados (519) según los valores típicos mostrados en la Tabla 7 (Metcalf & Eddy 1996). Para la parte en construcción se calculó el gasto teórico para 102 camas y 316 empleados.

Tabla 7. Valores típicos de consumo.

| | | Caudal litros/unidad*día | |
|----------------------------|----------|--------------------------|--------------|
| Hospital médico | Unidad | Intervalo | Valor típico |
| | Cama | 490 – 1000 | 550 |
| | Empleado | 20 – 60 | 40 |

3.2 Caracterización del agua residual.

Para llevar a cabo la caracterización del agua se tomaron seis muestras cada cuatro horas (2, 6 y 10 am; 2, 6, 10 pm) por cuatro días (20 y 27 de junio, 4 y 11 de julio). A cada una de las muestras se les determinaron los contaminantes mostrados en las Tablas 10, 11 y 12. Además, se hicieron cuatro muestras compuestas (una por cada día de muestreo), a las cuales se les determinaron los contaminantes mencionados en la Tabla 9. La caracterización se realizó conforme a la NOM-002-ECOL-1996. Los análisis para determinar cada contaminante se realizaron conforme a las normas mexicanas (NMX's) señaladas en las referencias de la NOM-002-ECOL-1996.

3.3 Filosofía de operación del sistema de tratamiento.

El sistema de tratamiento deberá de tener las siguientes características:

- a. El agua tratada debe de cumplir con la norma NOM-03-ECOL-1997.
- b. El sistema de tratamiento debe ser semi-automatizado con una mínima participación del operador, para que éste se dedique fundamentalmente al monitoreo de las condiciones generales de operación. El sistema de tratamiento deberá contar con una consola de control de motores y un micro PLC (power line communication) desde donde se controlaran las operaciones de bombeo y aireación.
- c. El sistema de tratamiento no debe desentonar con el conjunto arquitectónico del hospital.
- d. El sistema de tratamiento debe de cumplir con los criterios de septicidad, entre ellos no despedir malos olores, evitar derrames y evitar el contacto humano con los residuos hospitalarios que son vertidos al drenaje del hospital.
- e. El sistema debe generar el mínimo posible de lodos y se debe establecer un procedimiento de eliminación de los mismos que no dañe al medio ambiente.
- f. Un cárcamo de bombeo que haga las funciones de tanque regulador para alimentar al sistema de tratamiento y que tenga un sistema de cribado adecuado para eliminar, además de los sólidos grandes usuales en las aguas municipales, los encontrados eventualmente en estas aguas hospitalarias que son: guantes y botas de cirujano, campos quirúrgicos, bolsas de suero y otras bolsas de plástico, agujas, tapas de jeringas, jeringas, tapa bocas y gasas. Por ser considerados estos sólidos como residuos hospitalarios deben ser desechados de manera especial.

3.4 Diseño de equipo.

Se diseñó el equipo del sistema de tratamiento de aguas residuales (cárcamos, reactores biológicos, sedimentador, clorador, etc.) siguiendo criterios de diseño específicos de cada equipo, los cuales son mencionados en el apartado de resultados para facilitar la comprensión.

IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Estimación del gasto de agua.

Se llevó a cabo el monitoreo del gasto de agua de un hospital cada tres horas durante 12 días en el mes de junio del 2006. Los resultados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Gasto diario acumulado de agua (expresado en m³).

| Días de monitoreo | Horas de monitoreo | | | | | | | | |
|-------------------|--------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 |
| 1 Lunes | 0 | 16.2 | 32.4 | 48.6 | 64.8 | 81 | 88 | 95 | 102 |
| 2 Martes | 0 | 17 | 38 | 60 | 74 | 88 | 92 | 96 | 100 |
| 3 Miércoles | 0 | 15 | 35 | 50 | 71 | 100 | 108.3 | 116.6 | 125 |
| 4 Jueves | 0 | 13 | 31 | 40 | 52 | 61 | 71 | 81 | 91 |
| 5 Viernes | 0 | 6.3 | 12.6 | 18.9 | 37.9 | 48.9 | 51.5 | 54.2 | 56.9 |
| 6 Sábado | 0 | 13 | 21 | 30 | 36 | 40 | 60.3 | 80.6 | 100.9 |
| 7 Domingo | 0 | 2.6 | 5.2 | 7.8 | 21.8 | 27.8 | 39.4 | 51.1 | 62.8 |
| 12 Lunes | 0 | 2 | 7 | 46 | 58 | 68 | 76.3 | 84.6 | 93 |
| 8 Martes | 0 | 14 | 40 | 54 | 66 | 84 | 91 | 98 | 105 |
| 9 Jueves | 0 | 10.5 | 21 | 25.6 | 30.2 | 34.8 | 41.4 | 48.1 | 54.8 |
| 10 Sábado | 0 | 9 | 18 | 26.6 | 35.2 | 43.8 | 46.4 | 49.1 | 51.8 |
| 11 Domingo | 0 | 9.5 | 19 | 28.6 | 38.2 | 47.8 | 54.4 | 61.1 | 67.8 |

El gasto promedio fue calculado con base en los 12 días de consumo y fue de 90.38 m³ por día, mientras que el gasto máximo se observó en el día tres (Tabla 8) y fue de 125 m³. El gasto calculado según el número de camas y de empleados fue 111.57 m³/día, por lo que la diferencia entre el valor medido y el calculado fue de 21.19 m³ por día.

Para la parte del hospital en construcción el gasto estimado fue de 68.74 m³ por día, por lo que el gasto total con base en los gastos estimados fue de 180.31 m³ por día. Dadas las variaciones en el gasto diario y tomando en cuenta futuras ampliaciones del hospital, durante la vida útil del sistema de tratamiento, se consideró un caudal a tratar de 200 m³ por día.

4.2 Caracterización del agua residual.

Se caracterizó el agua residual por cuatro días (20 y 27 de junio, 4 y 11 de julio). En la Tabla 9 se muestran los resultados de las muestras compuestas. Las concentraciones de los contaminantes, como los sólidos suspendidos y la DBO de las aguas residuales analizadas fueron comparados con las concentraciones promedio de contaminantes de las aguas residuales municipales y de hospitales reportados por ANAM (2003) mencionados en la Tabla 2. Los sólidos suspendidos fueron menores (172 mg/l el valor más alto) en el efluente hospitalario caracterizado comparados con los valores reportados para el agua municipal (300 mg/l) y para la de hospitales (225 mg/l). En cuanto a la DBO, la concentración máxima fue de 425.13 mg/l para el efluente caracterizado siendo mayor que la DBO de las aguas residuales municipales (220mg/l), pero menor que la encontrada en hospitales (603mg/l). Estas diferencias pudieran ser a causa de la cantidad de pacientes que atienden a diario, si hay más pacientes sería lógico que se generara más contaminación. También se pudiera deber a que no se tenga una buena práctica para generar menos contaminantes y sobre el uso responsable del recurso hídrico por parte del personal del hospital.

Tabla 9. Caracterización del agua residual.

| Parámetros | Muestras | | Muestra Compuesta. | | |
|----------------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | Promedio |
| | 20 junio | 27 junio | 4 julio | 11 julio | |
| DBO mg/l | 400.8 | 279.64 | 425.13 | 180.57 | 321.53 |
| SST mg/l | 101.67 | 152.50 | 172.00 | 53.25 | 119.85 |
| Sólidos sedimentables ml/l | 3.0 | 2.0 | 1.5 | 0.6 | 1.77 |
| Huevos de helminto | Ausencia | Ausencia | Ausencia | Ausencia | Ausencia |
| Nitrito mg/l | 0.47 | 0.52 | 0.29 | 0.15 | 0.35 |
| Nitrato mg/l | 0.43 | 0.85 | 0.83 | 0.83 | 0.73 |
| Nitrógeno total mg/l | 49.24 | 25.60 | 55.39 | 29.84 | 40.01 |
| Fósforo total mg/l | 10.43 | 5.30 | 12.50 | 3.25 | 7.87 |
| Metales pesados. (ppm) | | | | | |
| Cinc (Zn) | 0.0724 | 0.174 | 0.91 | 0.091 | 0.1071 |
| Cobre (Cu) | 0.045 | 0.144 | 0.066 | 0.24 | 0.1237 |
| Níquel (Ni) | 0.02 | < 0.01 | < 0.01 | 0.011 | 0.0127 |
| Cadmio (Cd) | 0.01 | < 0.002 | < 0.002 | < 0.002 | 0.004 |
| Plomo (Pb) | < 0.01 | < 0.01 | < 0.01 | 0.06 | 0.0225 |
| Arsénico (As) | 0.0043 | 0.0012 | 0.0015 | 0.0011 | 0.002 |
| Cromo (Cr) | < 0.006 | < 0.006 | < 0.006 | < 0.006 | 0.006 |

En la Tabla 10 se muestran los resultados de coliformes fecales para cada hora de muestreo, los resultados mostraron que existe variabilidad en las concentraciones de coliformes con respecto a la hora de muestreo. La concentración promedio fue de 31×10^6 NMP/100ml, y la más alta fue mayor o igual a 160×10^6 NMP/100ml. Esto se puede deber a que tanto personal como los pacientes, hacen uso de los servicios sanitarios a distintos horarios.

Tabla 10. Coliformes fecales.

| Muestras. Hora de muestreo. | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| | 20 junio | 27 junio | 4 julio | 11 julio |
| | NMP/100ml | | | |
| 2 am | 17x10 ⁶ | 11x10 ⁶ | 24x10 ⁶ | 2.4x10 ⁶ |
| 6 am | ≥ 160x10 ⁶ | 3.3x10 ⁶ | 5x10 ⁶ | 8x10 ⁶ |
| 10 am | 50x10 ⁶ | 17x10 ⁶ | 90x10 ⁶ | 160x10 ⁶ |
| 2 pm | 50x10 ⁶ | 11x10 ⁶ | 24x10 ⁶ | 22x10 ⁶ |
| 6 pm | 5x10 ⁶ | 8x10 ⁶ | 8x10 ⁶ | 8x10 ⁶ |
| 10 pm | 5x10 ⁶ | 50x10 ⁶ | 5x10 ⁶ | 500,000 |

El contenido de grasas y aceites para cada hora de muestreo se muestra en la tabla 11, éstos tuvieron un comportamiento similar al de los coliformes fecales, la concentración más elevada fue de 187 mg/l y el promedio de 39.42 mg/l. Las fluctuaciones pudieron deberse al horario en que la cocina del hospital está en funciones.

Tabla 11. Contenido de grasas y aceites.

| Muestras. Hora de muestreo. | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------------------------|----------|----------|---------|----------|
| | 20 junio | 27 junio | 4 julio | 11 julio |
| | mg/l | | | |
| 2 am | 27.59 | 6.50 | 15.56 | 3.93 |
| 6 am | 58.63 | 17.43 | 36.84 | 12.10 |
| 10 am | 83.55 | 30.48 | 61.99 | 31.82 |
| 2 pm | 187.1 | 26.14 | 35.84 | 4.49 |
| 6 pm | 67.56 | 38.89 | 28.34 | 29.82 |
| 10 pm | 25.03 | 11.17 | 13.74 | 2.67 |

Los valores de pH y temperatura de cada muestra se muestran en la Tabla 12. El promedio del pH fue de 7.98 y la mayoría de los valores estuvieron por encima de 7, registrándose un valor de 8.94 que fue el más elevado. Solamente se registró un valor menor que 7, este fue de 6.38. Por lo tanto el agua residual fue ligeramente alcalina, esto pudo ser causado por los desinfectantes que se usan en el hospital. La temperatura estuvo por arriba de los 28 °C y el promedio fue de 30.33°C, pero se

registraron dos valores elevados (42.3 y 42.7°C) ambos en un mismo día de muestreo. Cabe señalar que el monitoreo del pH y temperatura se realizó en temporada de calor, por lo tanto en tiempo de frío se pudieran registrar datos diferentes.

Tabla 12. Temperatura y pH.

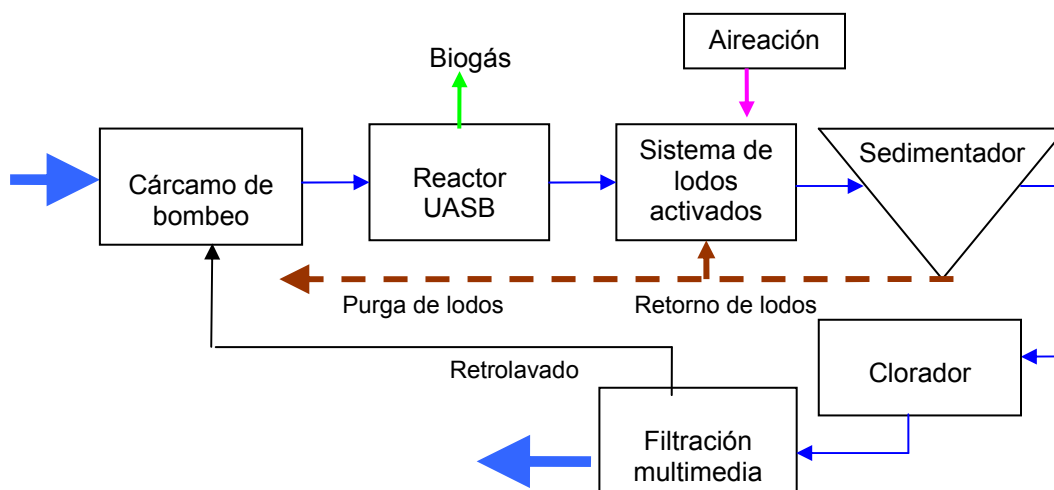
| Muestras. Hora de muestreo. | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | |
|--------------------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | 20 junio | | 27 junio | | 4 julio | | 11 julio | |
| | Temperatura (°C) | pH | Temperatura (°C) | pH | Temperatura (°C) | pH | Temperatura (°C) | pH |
| 2 am | 29.0 | 8.34 | 42.3 | 8.58 | 28.0 | 8.19 | 31.0 | 7.59 |
| 6 am | 28.5 | 7.23 | 26.83 | 8.81 | 28.1 | 7.61 | 30.0 | 8.16 |
| 10 am | 29.1 | 7.17 | 28.6 | 8.16 | 29.4 | 8.61 | 28.0 | 7.61 |
| 2 pm | 30.0 | 7.51 | 28.8 | 8.83 | 29.0 | 8.74 | 31.8 | 7.53 |
| 6 pm | 29.5 | 7.89 | 29.4 | 8.94 | 29.0 | 8.40 | 29.0 | 7.59 |
| 10 pm | 30.5 | 7.25 | 42.7 | 8.72 | 29.0 | 6.38 | 30.6 | 7.9 |

Algunos de los contaminantes analizados del agua residual (Tabla. 13) rebasaron la concentración máxima permisible establecida por la NOM 003 ECOL 1997. Por lo tanto se eligió un sistema con tratamientos primario, secundario y terciario para producir agua que cumpla con la NOM 003 ECOL 1997, conformado básicamente por los siguientes procesos y operaciones unitarias mostradas en la Figura 2.

Tabla 13. Contaminantes del agua residual que no cumplen con la concentración requerida por la NOM 003 ECOL 1997.

| Contaminantes | Concentración promedio | Concentración máxima | NOM 003 ECOL 1997 |
|-------------------------------|------------------------|----------------------|-------------------|
| DBO mg/l | 321.53 | 425.13 | 20 |
| SST mg/l | 119.85 | 172 | 20 |
| Coliformes fecales NMP/100 ml | 31x10 ⁶ | 160x10 ⁶ | 240 |
| Grasas y aceites mg/l | 39.42 | 187.1 | 15 |

Figura 2. Tren de tratamiento.



A continuación se describe la función de cada una de las operaciones unitarias que componen el tren de tratamiento:

- Cárcamo de bombeo para el almacenamiento de los efluentes y a la vez funcionará como tanque regulador para la alimentación del resto del sistema. También deberá incluir una criba para eliminar los sólidos que puedan dañar a los equipos electromecánicos.
- Reactor anaeróbico, preferentemente del tipo UASB, para reducir la mayor parte de la materia orgánica a un costo operativo bajo.
- Un reactor de lodos activados completamente mezclado para remover la carga orgánica remanente proveniente del reactor anaerobio.
- Sedimentador empleado para clarificar el efluente del reactor de lodos activados, el lodo sedimentado se recirculará hacia el reactor de lodos activados para mantener la concentración de lodos o se purgará del sistema si está en exceso.
- Cámara de cloración o desinfección con el fin de eliminar los microorganismos patógenos presentes en el efluente mediante contacto con cloro por un intervalo de tiempo.
- Filtro multimedia para remover sólidos suspendidos y sólidos volátiles que aun se encuentren en el efluente. El filtro deberá contar con retrolavado y control de tiempo para un mejor manejo.

4.3 Diseño de equipo.

Para el diseño se tomó en cuenta un caudal a tratar de 200 m³/d (8.33 m³/h) de agua residual, además de los contaminantes (Tabla 13) que no cumplen con la NOM-003-ECOL-1997.

4.4 Cárcamo de bombeo.

Para el hospital en operación se calculó el volumen requerido para el cárcamo considerando los valores obtenidos del monitoreo de consumo de agua (Tabla 8) correspondientes al día en el que hubo un mayor consumo (125 m³ por día). El consumo promedio fue de 5.2 m³/h. El volumen requerido del cárcamo se obtuvo restando el valor más negativo del más positivo de la diferencia que hubo entre el consumo acumulado y el acumulado real (Tabla de 14). Se obtuvo un valor de 22.6 m³, que equivale a 0.135 m³/cama. Para la parte en construcción (102 camas) se estimó que se mantenía esta relación, por lo que el volumen fue de 13.8 m³ y el volumen total del cárcamo 36.4 m³.

Tabla 14. Estimación del cárcamo de bombeo.

| Consumo m ³ /3h | Consumo acumulado | Consumo real | Diferencia |
|-------------------------------|----------------------|-----------------|------------|
| 15 | 15.6 | 15 | 0.6 |
| 20 | 31.2 | 35 | -3.8 |
| 15 | 46.8 | 50 | -3.2 |
| 21 | 62.4 | 71 | -8.6 |
| 29 | 78 | 100 | -22 |
| 8.3 | 93.6 | 108.3 | -14.7 |
| 8.3 | 109.2 | 116.6 | -7.4 |
| 8.3 | 124.8 | 124.9 | -0.1 |

El tiempo de retención hidráulica (TRH) fue estimado dividiendo el volumen del cárcamo calculado para el hospital en operación entre el consumo promedio dando un TRH de 4.34 horas.

4.5 Reactores biológicos.

Se diseñaron dos reactores biológicos, un UASB para remover la mayor parte de la DBO y uno de lodos activados para remover la DBO remanente. Con ambos reactores se logra la disminución de SST, Nitrógeno, fósforo, patógenos, grasas y aceites. (Noyola-Robles, 2004)

4.6 Reactor UASB.

Diseñado con base a los criterios específicos para este tipo de reactores y las fórmulas correspondientes, (Metcalf & Eddy, 2003). Se hizo el diseño estableciendo una eficiencia de remoción del 65%, una altura del reactor de 4.5 metros m, la cual está dentro del rango que establece el criterio (2.5 a 5 m). De acuerdo al intervalo de TRH recomendado que es de 4 a 6 horas (Metcalf & Eddy, 2003), se escogió un valor de 6 horas, además se seleccionó como temperatura de operación de 30 °C la temperatura promedio del agua residual.

Además se empleó la siguiente relación DBO/DQO como factor de conversión $1g\ DBO = 2.26\ gDQO$ para calcular la DQO equivalente del agua residual en el influente del reactor UASB que fue de 726.65 miligramos de DQO por litro (mgDQO/l). También se tomó en cuenta que la corriente de entrada sería un caudal de $8.33\ m^3/h$ equivalente a $200\ m^3/d$ y que la carga de SST fue de 119.85 mg/l. (ANAM, 2003)

- a. Volumen del reactor. El volumen se obtuvo empleando la fórmula 1.

Fórmula 1.

$$V = Q * TRH \quad V = \left(8.33\ m^3/h\right) * (6h) = 50m^3$$

- b. Área del reactor. Para conocer el área del reactor se utilizó la fórmula 2.

Fórmula 2.

$$A = \frac{Q}{V_a} \quad A = \frac{8.33 \text{ m}^3/\text{h}}{0.75 \text{ m/h}} = 11.10 \text{ m}^2$$

Donde:

V = Volumen del reactor.

A = Área.

V_a = Velocidad de ascensión.

Q = Caudal.

TRH = Tiempo de retención hidráulica.

- c. Relación largo-ancho. Se estableció una relación de dos metros de largo por cada metro de ancho (fórmula 3).

Fórmula 3.

$$a = \sqrt{\frac{A}{2}} \quad a = \sqrt{\frac{11.10 \text{ m}^2}{2}} = 2.35 \text{ m}$$

$$L = 2(a) \quad L = 2(2.35 \text{ m}) = 4.71 \text{ m}$$

- d. Velocidad ascendente. El rango de velocidad ascendente permitido es de 0.6 a 0.9 m/h. La velocidad que se obtuvo fue de 0.75 m/h (fórmula 4).

Fórmula 4.

$$V_a = \frac{H}{\text{TRH}} \quad V_a = \frac{4.5 \text{ m}}{6 \text{ h}} = 0.75 \text{ m/h}$$

Donde:

a = ancho.

H = altura.

L = largo

- e. Número líneas de distribución. Se calculó el número de líneas requerido para tener una distribución homogénea del agua y de la materia orgánica dentro del reactor. El número de líneas se calculó empleando la siguiente fórmula.

Formula 5.

$$\#lineas = (0.5)(Area) = 0.5 * 11.10 = 6$$

- f. Separador de fases. Se estableció que el separador de fases fueran tres campanas colectoras del biogás. Además, se propuso el uso de deflectores en las paredes del reactor para guiar el biogás hacia las campanas colectoras. El separador se situó a 3.4 m de altura y el área libre total por donde pasa el agua tratada es de 2.22 m².
- g. Eficiencia de remoción. Se estableció una eficiencia de remoción de materia orgánica de 65% por lo que el efluente del reactor queda con 254.3. mgDQO/l. La materia orgánica removida fue de 472.3 mg DQO/l y se asumió que el 10% se convierte en biomasa y el 90% en biogás. (Noyola-Robles, 2004). Empleando la misma eficiencia de 65% se consideró una disminución por el tratamiento de los sólidos suspendidos de 119.85 mg/l en el influente a 41.94 mg/l en el efluente. Considerando que el 80% de los sólidos son microorganismos y tomando en cuenta que la concentración promedio fue de 31 008 333 NMP/100ml la remoción teórica sería de 23 256 249 NMP/100ml quedando 7 752 083 NMP/100ml, en el efluente del reactor UASB. Se debe tomar en cuenta que durante el tratamiento biológico los microorganismos patógenos se pueden reproducir. Por lo tanto no se asegura la remoción completa con el tratamiento biológico y es por eso que se necesita una desinfección mas adelante.
- h. Producción de metano. El biogás esta compuesto principalmente por CO₂ (35%) y metano (65%). Para calcular el metano se necesitó un factor de producción de metano a 35 °C (0.4 m³CH₄/kgDQO), la temperatura de operación (30 °C) expresado en grados Kelvin y la DQO removida por día (94.4 kgDQO/d). Todos estos parámetro se emplearon en la siguiente formula.

Fórmula 6.

$$\text{ProduccionCH}_4 = \left[\left(0.4 \text{ m}^3 \text{CH}_4 / \text{kgDQO} \right) * \frac{273.15 + 30}{273.15 + 35} \right] * [94.4 \text{ kgDQO / dia}]$$

La producción diaria de metano que fue de 37.14 m³ de metano (m³CH₄/d) y la producción total de biogás fue de 57.13 m³gas/d.

El diseño del reactor respeta los criterios (altura, TRH, velocidad de ascensión) establecidos por Metcalf & Eddy, (2003) esto asegura teóricamente la funcionalidad y que cumplirá con la eficiencia establecida (65%). Los reactores UASB llegan a tener más del 90% de eficiencia pero en cuestiones de diseño es preferible manejar eficiencias por debajo de 90% por que no se conoce la calidad del lodo que degradará la materia orgánica y la mayor eficiencia de remoción se obtiene con el tiempo que tenga un reactor funcionando, por la adaptación de los lodos a ese ecosistema. (Mansur-Aisse, et al. 2000)

4.7 Lodos activados.

Se diseñó un reactor de lodos activados completamente mezclado, con la finalidad de remover los contaminantes remanentes en el efluente del reactor UASB. La Tabla 15 muestra los criterios de diseño empleados para el tanque de lodos activados completamente mezclado.

- a. Relación altura diámetro. Se consideró una relación de 1:1.3 y se estableció una altura de 3 m, por lo que el diámetro fue de 3.9 m.
- b. Área. Se propuso un reactor con forma cilíndrica, con un área de 11.94 m².
- c. Volumen nominal (Vn) y volumen de operación (V). El volumen nominal es el volumen total del reactor y se empleó la fórmula 7 para calcularlo, mientras

que el volumen de operación es aquel que ocupa el agua residual a tratar dentro del reactor (fórmula 1).

Fórmula 7.

$$V_n = H * A \qquad V_n = 3\text{m} * 11.94\text{m}^2 = 35.83\text{m}^3$$

$$V = Q * \text{TRH} \qquad V = \left(8.33\text{m}^3/\text{h}\right) * (4\text{h}) = 33.32\text{m}^3$$

Tabla 15. Eficiencia, criterios de diseño y constantes cinéticas para reactores de lodos activados completamente mezclados.

| Eficiencia 80% | | |
|---|--|-----------------------------|
| DBO influente $S_o = 112.53 \text{ mg/l}$ | DBO efluente $S = 22.5 \text{ mg/l}$ | |
| SST influente $S = 41.94 \text{ mg/l}$ | SST efluente = 8.38 mg/l | |
| Criterios de diseño | | |
| Caudal (Q) | 200 m^3/d | |
| Retención celular (Θ) | 5 a 15 días (d) | |
| Relación F/M | 0.2 a 0.6 $\text{KgDBO}/\text{kgSSVLM} * \text{d}$ | |
| SSLM | 2500 a 4000 mg/l | |
| SSVLM | 80% SSLM | |
| Recirculación (Q_r) | 25 a 100 % | |
| TRH | 3 a 5 (h) | |
| Carga volumétrica | 0.81 a 1.94 $\text{KgDBO}/\text{m}^3 * \text{d}$ | |
| Relación altura-diámetro | 1:1.3 m | |
| Constantes Cinéticas. | | |
| Θ | 10 | Días |
| Kd | 0.05 | d^{-1} |
| Y | 0.6 | $\text{mgSSV}/\text{mgDBO}$ |

- d. Producción de lodos. El reactor debe contener una concentración de sólidos o lodos, por lo tanto se estableció que la concentración de sólidos suspendido en la mezcla (SSLM) fuera de 2500 mg/l, la cual queda dentro del rango que se maneja para estos reactores (Tabla 15). Los sólidos suspendidos volátiles en la mezcla (SSVLM) equivalen al 80% de SSLM (Tabla 15) puesto que se consideran que del total de sólidos en la mezcla el 80% son microorganismos (también llamados SSVLM), la concentración de éstos sería de 2000 mg/l.

- e. Relación F/M. Se refiere a la relación que hay entre la cantidad de alimento (nutrientes orgánicos biodegradables) y la cantidad de microorganismos en el reactor (fórmula 8) (Buitrón et al. 2006). El valor obtenido (0.3 KgDBO/kgSSVLM*d) está dentro del rango (Tabla 15) que establece el criterio.

Fórmula 8.

$$F/M = \frac{QSo}{XV} = \frac{(200 \text{ m}^3/\text{d} * 112.53 \text{ mg/l})}{(2000 \text{ mg/l} * 33.32 \text{ m}^3)} = 0.33 \text{ KgDBO/kg SSVLM*d}$$

Donde:

F/M = Relación entre alimento y microorganismos Q = Caudal.
 So = Concentración inicial de alimento (DBO). V = Volumen del reactor.
 X = Concentración de lodos (SSVLM).

- f. Producción observada (Yobs). Es la producción de microorganismos con respecto al sustrato suministrado. Para calcular Yobs se empleó la fórmula 9 y se tomaron en cuenta las constantes cinéticas (Tabla 15) para diseño de tanques de lodos activados con recirculación de lodos. (Metcalf & Eddy, 1996)

Fórmula 9.

$$Y_{\text{obs}} = \frac{y}{1 + k_d \theta} = \frac{0.6 \text{ mgSSV/mgDBO}}{1 + (0.05 \text{ d}^{-1} * 10 \text{ d})} = 0.4 \text{ mgSSV/mgDBO}$$

Donde:

Yobs = Producción observada.
 k_d = Coeficiente de descomposición endógena.
 Y = Coeficiente de producción máxima.
 Θ = Tiempo de retención celular.

- g. Producción diaria de lodo. Se refiere a la cantidad de lodo (microorganismos) que se genera en un día. La producción diaria de calculó empleando la siguiente fórmula. (Metcalf & Eddy, 2003)

Fórmula 10.

$$P_x = Y_{obs}Q (S_o - S) \left(10^3 \text{ g/kg}\right)^{-1}$$

$$P_x = 0.4 * 200 \text{ m}^3/\text{d} (112.53 - 22.5) \text{ mg/l} \left(10^3 \text{ g/kg}\right)^{-1} = 7.2 \text{ kg/d}$$

Donde:

P_x = Producción diaria de lodo.

Y_{obs} = Producción observada.

S_o = Concentración inicial de alimento (DBO).

S = Concentración final de alimento (DBO).

Q = Caudal.

- h. Recirculación de lodos (Q_r). Se consideró una concentración de lodos en la línea de recirculación de 8000 mg/l la recirculación fue de 65.5 m³/d equivalente al 33.4% de tasa de recirculación por lo tanto queda dentro del criterio establecido (Tabla 15). El valor de Q_r se obtuvo de la siguiente manera (fórmula 11). (Metcalf & Eddy, 2003)

Fórmula 11.

$$Q_r = \frac{\left[XQ - \left(\frac{XV}{\theta_c} \right) \right]}{(X_r - X)} = \frac{\left[2000 \text{ mg/l} * 200 \text{ m}^3/\text{d} - \left(\frac{2000 \text{ mg/l} * 33.32 \text{ m}^3}{10 \text{ d}} \right) \right]}{(8000 \text{ mg/l} - 2000 \text{ mg/l})}$$

$$Q_r = 65.5 \text{ m}^3/\text{d}$$

- i. Requerimiento de oxígeno. Se refiere a la cantidad de oxígeno que se necesita suministrar al reactor para mantenerlo funcionando. El oxígeno calculado fue (fórmula 12). (Metcalf & Eddy. 2003)

Fórmula 12.

$$KgO_2 = \frac{Q(S_o - S) \left(10^3 \text{ g/kg}\right)^{-1}}{f} - 1.42(P_x)$$

$$KgO_2 = \frac{200 \times 10^3 \text{ l/d} (112.53 - 22.5) \text{ mg/l} \left(10^3 \text{ g/kg}\right)^{-1}}{0.7} - 1.42 (7.2 \text{ Kg/d}) =$$

$$KgO_2 = 15.49 \text{ kgO}_2/\text{d}$$

Donde:

KgO_2 = Requerimiento de oxígeno.

P_x = Producción diaria de lodo.

S_o = Concentración inicial de alimento (DBO).

S = Concentración final de alimento (DBO).

Q = Caudal.

f = Factor de conversión DBO_5 a DBO_L .

- j. Eficiencia de transferencia operativa. OTE por sus siglas en inglés "Operating Transfers Efficient" indica la eficiencia de transferencia del oxígeno atmosférico al seno del líquido ya que este oxígeno es el que está disponible para los microorganismos. Para calcularlo se consideraron los valores mostrados en la Tabla 16 y la fórmula 13. (Metcalf & Eddy, 2003)

Fórmula 13.

$$OTE = \frac{STE \left[\left(C_{S_t} \right) (\beta)(P) - C_L \right]}{9.17} = \alpha (1.02)^{T-20}$$

$$OTE = \frac{28\%[(7.54 \text{ mg/l})(0.9)(1) - 3]}{9.17} 0.85(1.02)^{30-20} = 11.98\%$$

Tabla 16. Bases de diseño para el cálculo de la eficiencia de transferencia operativa.

| Parámetro. | Valor. |
|--|-----------|
| STE = Eficiencia operativa estándar | 28 % |
| $(C_s)_T$ = O ₂ disuelto saturado a Temperatura Máxima. | 7.54 mg/l |
| β = O ₂ saturado en el agua limpia. | 0.9 |
| P = Factor de corrección por presión. | 1 |
| C _L = Concentración mínima de O ₂ en el tanque. | 3 mg/l |
| α = O ₂ transferido en agua residual/O ₂ transferido en agua limpia () | 0.85 |
| T = Temperatura. | 30 °C |

- k. Flujo de aire requerido (Ra). El flujo de aire calculado para el reactor de lodos fue de 1.17306×10^{-7} pies cúbicos por minuto (cfm) de aire. Éste valor se obtuvo empleando la fórmula 14. El oxígeno suministrado por este flujo fue de 18.233 KgO₂/día (fórmula 15). El oxígeno requerido por el tanque de lodos fue de 15.49 KgO₂/día por lo tanto el flujo de aire es el ideal para cubrir la necesidad de oxígeno.

Fórmula 14.

$$Ra = \frac{O_2(10^5)(7.8)}{OTE(0.0176)(1440)V(10^6)}$$

$$Ra = \frac{34.15 \text{ lbO}_2 / \text{d} (10^5)(7.8 \text{ gal} / \text{ft}^3)}{11.98\% (0.0176 \text{ lbO}_2 / \text{ft}^3 \text{ O}_2)(1440 \text{ min} / \text{d}) 8802.2 \text{ gal} (10^6)}$$

$$Ra = 1.17306 \times 10^{-7} \text{ cfm}$$

Oxígeno suministrado (Formula 15).

$$O_2 = \frac{Ra \text{ (OTE)} (0.0176)(1440)V(10^6)}{(10^5)(7.8)}$$

$$O_2 = \frac{1.005 \times 10^{-7} \text{ cfm} (11.98) (0.0176 \text{ lbO}_2/\text{ft}^3 \text{ O}_2)(1440 \text{ min/d})8802.2 \text{ gal}(10^6)}{(10^5)(7.8 \text{ gal}/\text{ft}^3)}$$

$$O_2 = 18.233 \text{ KgO}_2/\text{día}$$

- I. Remoción de patógenos. La concentración de patógenos que entraron al tanque de lodos activados fue de 7 752 083 NMP/100ml. Se consideró una eliminación del 80 % por lo tanto la remoción fue de 6 201 666 NMP/100ml quedando en el efluente 1 550 416 NMP/100ml. (ANAM, 2003)

El diseño respetó los rangos y limitantes que establecen los criterios por lo tanto en teoría el reactor es funcional y cumple con el objetivo.

4.8 Sedimentador.

Para el diseño del sedimentador se seleccionó una relación altura diámetro de 1:1.3 y se estableció una altura de 2.7 metros por lo tanto el diámetro fue de 3.51 metros. El área que se obtuvo fue de 9.47 m² y un volumen de 25.58 m³.

Carga superficial, carga sobre vertedero. Para el caso de la carga superficial y la carga sobre vertedero se obtuvieron de la división del caudal (200m³/d) entre el área (9.47 m²) el resultado fue de 21.1 m³/m²*día para ambos casos. El criterio para carga superficial establece un rango de 16 a 35 m³/m²*d por lo tanto el valor obtenido queda dentro del rango. Para la carga sobre vertedero el criterio de diseño establece que debe ser menor o igual a 125 m³/m²*d, la carga sobre vertedero calculada esta por debajo del 125 m³/m²*d por lo tanto es aceptable.

El TRH se obtuvo de la misma forma de la carga superficial y carga sobre vertedero pero el caudal se expresó en metros cúbicos por hora ($8.33 \text{ m}^3/\text{h}$), el TRH fue de 3 horas. El criterio para este caso dice que el TRH debe de estar entre 2.5 a 6 horas por lo tanto el TRH que se obtuvo queda dentro del rango.

Eficiencia de remoción. Los sedimentadores remueven el 15 % de DBO por lo tanto de 22.5 mg/l de entrada quedó en 19.1 mg/l en la salida hacia el clorador.

4.9 Clorador.

Fue diseñado para alcanzar el límite de patógenos permitido por la NOM-003-ECOL. ($240 \text{ NMP}/100\text{ml}$). Se propuso el uso de hipoclorito de sodio (NaOCl) como agente desinfectante.

La dosis de cloro se obtuvo empleando la siguiente fórmula. (Metcalf & Eddy. 2003)

Fórmula 16.

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{C_R t}{b} \right)^{-n} \quad \frac{240}{1550416} = \left(\frac{C_R 60}{4.0} \right)^{-2.8}$$

Donde:

N = concentración final $240 \text{ NMP}/100\text{ml}$.

b = coeficiente 4.0.

N_0 = concentración Inicial $1,550,416 \text{ NMP}/100\text{ml}$.

n = coeficiente 2.8.

C_R = cloro residual.

t = tiempo de contacto 60 min.

La dosis de cloro necesaria para tratar los $200 \text{ m}^3/\text{d}$ fue de 306 gramos de cloro por día, por lo que se necesitan $645.66 \text{ gNaOCl}/\text{d}$ para cumplir con la dosis de cloro necesaria.

Para el diseño del tanque de cloración se estableció un TRH de 60 minutos equivalente a 0.041 días. Para un mejor efecto de contacto entre el hipoclorito de sodio y el agua residual se estableció que el tanque de cloración contara con dos deflectores (Figura 3) para que el tanque tuviera dos canales paralelos en el interior, también se estableció un ancho de 2.2 m, y una profundidad de 2.5 m. La longitud calculada (fórmula 17) fue de 2.98 m, y así el área del clorador fue de 6.56 m², y el volumen fue de 16.4 m³.

Fórmula 17

$$L = Q * TRH \left[\frac{Nd}{a * h} \right] \quad L = 200 \text{m}^3/\text{d} * 0.041 \text{d} \left[\frac{2}{2.2 \text{m} * 2.5 \text{m}} \right]$$

Donde:

L = Longitud.

Q = Caudal.

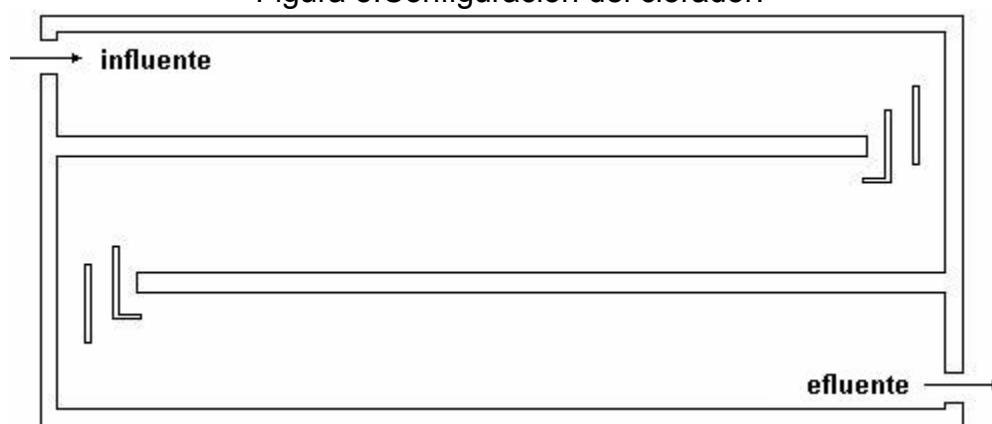
TRH = Tiempo de retención hidráulica.

h = Altura.

Nd = número de deflectores.

a = ancho.

Figura 3. Configuración del clorador.



4.10 Filtro multimedia.

Se propuso un filtro multimedia comercial marca ACS modelo M201B-TC, se seleccionó este filtro por la sencillez de su diseño, flujo de operación y fácil manejo. El filtro es de fibra de vidrio y es empleado para la remoción de sólidos y patógenos del efluente. El filtro seleccionado opera con un flujo de 83.27 a 166.54 l/ minuto, es de forma cilíndrica y mide 157.5 cm. de alto por 50.8 cm. de ancho. Cuenta con tubería de 1.5 pulgadas y válvula con control de tiempo y retrolavado, el medio filtrante es antracita, arena garnet y grava.

4.11 Alcance general del sistema.

Los equipos diseñados cumplen con los criterios de diseños establecidos, por lo tanto deberán funcionar adecuadamente. La eficiencia teórica del sistema de tratamiento diseñado fue del 94% para la remoción de DBO, 93% para SST, y 99% para patógenos. La concentración esperada de los contaminantes en el efluente del sistema se muestra en la Tabla 17. En teoría el efluente del sistema de tratamiento diseñado permite obtener agua tratada que alcanza los límites máximos permitidos por la NOM 003 ECOL 1997 (Tabla 6) permitiendo usar el agua tratada para riego de áreas verdes, regar suelos, lavar autos, etc, teniendo un contacto directo o contacto ocasional con el hombre. El costo teórico por tratar el efluente con el tren de tratamiento propuesto sería de 8.25 pesos por metro cúbico (m³) de agua tratada. (Hernández Sancho F. Sala Garrido R, 2006)

Tabla 17. Comparación entre DBO, SST y coniformes entre el influente y el efluente del sistema de tratamiento de aguas residuales del hospital.

| Contaminante. | Concentración teórica esperada. | Concentración al inicio del sistema. |
|-----------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| DBO mg/l | 19.1 | 321.15 |
| SST mg/l | 8.38 | 119.85 |
| Coliformes NMP /100ml | 240 | 31 008 333 |

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.

Medir el gasto y caracterizar el agua residual de un hospital ayuda a diseñar el sistema de tratamiento y a formular el tren de tratamiento adecuado a las necesidades, ya que dicha agua tiene características especiales distintas a las de las aguas municipales.

Tener conocimiento de las normas oficiales que se aplican a las aguas residuales sirve de guía para conocer el alcance que se desea tener en el sistema de tratamiento.

Se diseñó un tren de tratamiento para las aguas residuales adecuado a las características inherentes del agua de un hospital, esto demuestra que se puede mejorar la calidad de los efluentes de aguas residuales de los hospitales a tal grado que se pueden reusar para el riego de áreas verdes y también cumplen con las normas oficiales que rigen la calidad de las aguas residuales por lo tanto se pueden evitar sanciones y multas.

Recomendaciones.

Se recomienda colocar un agitador en el cárcamo de bombeo para que homogenice el agua residual, también sería necesario que se purguen cada cierto tiempo los sólidos depositados en el fondo del cárcamo y que no exista acumulamiento. (EPA 2000)

El metano producido se puede quemar y emplear para calentar calderas o adicionarlo al tanque de lodos activado para eliminarlo también se pudiera emplear

en motores de combustión interna para producir energía eléctrica y esta ser aprovechada para alimentar las bombas y sopladores del sistema de tratamiento. (De Mes T.Z.D, Stams A.J.M, Reith J.H. and Zeeman G. 2003)

El exceso de lodo producido por los procesos biológicos y los sólidos obtenidos del cárcamo se puede estabilizar por digestión anaerobia y espesar y deshidratar para emplearlo como mejorador de suelos (abono) y en composta. (EPA 2000).

Para una mejor calidad del efluente se puede emplear un filtro de carbón activado para eliminar cloro residual, compuesto clorados y nitrogenados además de materia orgánica olor y color.

VI. LITERATURA CITADA

- Anónimo. 1996. Departamento de sanidad del estado de Nueva York. Manual de tratamiento de aguas negras. LIMUSA. México.
- Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM). 2003. Guía de prevención de la contaminación del recurso hídrico, caracterización y tratamiento de las aguas residuales para el sector de hospitales. Corporación para la investigación socioeconómica y tecnológica (CINSET). Republica de Panamá.
- Boner, M. Weston, R. F. 1999. Folleto informativo de tecnología de aguas negras, desinfección con ozono. EPA. Washington D. C.
- Buitrón, G. Razo-Flores, E. Meraz, M. & Alatraste-Mondragon, F. 2006. Biological wastewater treatment systems in advanced biological treatment processes for industrial wastewaters. Principles & applications. Cervantes, F.J. Pavlostathis, S.G. & van Haandel A. C. (Editors) IWA Publishing. ISBN: 1843391147.
- De Mes, T.Z.D. Stams, A.J.M. Reith, J.H. and Zeeman, G. 2003. Methane production by anaerobic digestion of wastewater and solid wastes. Bio methane and bio hydrogen status and perspectives of biological methane and hydrogen production. Reith J.H., Wijffels R.H. and Barten H. (Editors). Netherlands ISBN: 90-9017165-7 (ver: www.novem.org).
- Engineer Manual1110-2-501. 1999. Design, construction, and operation small wastewater systems. Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers. Washington, DC.
- Field, J. Sierra, R. 2005. Anaerobic granular sludge bed technology pages. (ver: www.uasb.org).
- Gutiérrez-Lavín, A. Bueno-de la Heras, J. L. 2003. Los sedimentadores lamelares en el tratamiento de aguas residuales. Departamento de ingeniería química y tecnología del medio ambiente. Universidad de Oviedo. (ver: www.itp-depuracion.com).

- Hernández-Sancho, F. Sala-Garrido, R. 2006. Modelización de costes en los procesos de tratamiento de aguas residuales. Universidad de Valencia. España. (ver: <http://www.uv.es/asepuma/XIV/comunica/56.pdf>).
- Mansur-Aisse, M. Boamorte-Lobalto, M. Bona, A. Garbosa, L.H. 2000. Evaluación de un sistema reactor UASB y lodos activados, en el tratamiento de líquidos domésticos.
- Metcalf & Eddy Inc. 1991. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse. 3rd ed. Mc Graw-Hill. USA.
- Metcalf & Eddy Inc. 1996. Ingeniería de las aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. 3rd ed. Mc Graw-Hill. México.
- Metcalf & Eddy Inc. 2003. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4th ed. Mc Graw-Hill. New York.
- Noyola-Robles A. 2004. Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Una experiencia en el desarrollo de tecnología biológica para el tratamiento de aguas residuales. Bolívar Zapata F G editor. México. SBN: 970-640-235-7.
- Ramalho, R. S. 1996. Tratamiento de aguas residuales. Reverté. México.
- Secretaria de medio ambiente recursos naturales y pesca. 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario oficial de la federación. México.
- Secretaria de medio ambiente recursos naturales y pesca. 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbanos o municipales. Diario oficial de la federación. México.
- Secretaria de medio ambiente, recursos naturales y pesca. 1997 Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales tratadas que se rehúsen en servicio al público. Diario oficial de la federación. México.
- U.S. Environmental protection agency (EPA).1999. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Desinfección con cloro. Office of water. Washington D.C. EPA 832-F-99-062.

- U.S. Environmental protection agency (EPA).2000. Folleto informativo de sistemas descentralizados. Sistemas de tanques sépticos para aplicaciones de alto caudal Office of water. Washington D.C. EPA 832-F-00-079.
- U.S. Environmental protection agency (EPA).2000. Folleto informativo de tecnología de biosólidos. Aplicación de biosólidos al terreno. Office of water. Washington D.C. EPA 832-F-00-064.