



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES CON FINES DE REÚSO”**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**  
**INGENIERA QUÍMICA**  
**P R E S E N T A:**  
**CECILIA BERENICE VITE MERAZ**



MÉXICO, D.F. **EXAMENES PROFESIONALES**  
**FACULTAD DE QUÍMICA**

2005

m. 344031



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**Jurado asignado:**

Presidente	Prof. JOSÉ ANTONIO ORTIZ RAMÍREZ
Vocal	Prof. LETICIA MA. DE LOS A. GONZÁLEZ ARREDONDO
Secretario	Prof. ALFONSO DURÁN MORENO
1er. Suplente	Prof. RODOLFO TORRES BARRERA
2do. Suplente	Prof. VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO

**Sitio donde se desarrolló el tema:**

Facultad de Química

Sustentante:

Cecilia Berenice Vite Meraz

Asesor:

Dr. Alfonso Durán Moreno

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Cecilia Berenice Vite Meraz

FECHA: 17 de Mayo del 2005

FIRMA: [Firma manuscrita]

A mis amados padres, Guillermo Vite y Rosa Meraz, a quienes agradeceré eternamente el apoyo incondicional que me han brindado para concluir esta importante etapa de mi vida. Sin su amor y motivación no habría sido posible.

A mi hermana Vero, por el cariño que me ha demostrado siempre, por haber estado a mi lado en los momentos más difíciles de mi vida y haber salido adelante juntas.  
Te quiero.

A mi familia entera por el amor, paciencia y comprensión ante los momentos más críticos de mi época universitaria, principalmente mi abuelo Eulalio por sus sabios consejos, apoyo y cariño. Los adoro.

A Arturo, quién con su inmenso amor contribuyó a la culminación de esta etapa y a lado de quién recogeré los frutos de ésta. Te amo.

A mis queridos amigos, Jorge, Cristian, Tinoco y Karina, por los momentos inolvidables que pasamos juntos en la universidad y a quienes siempre llevaré en mi corazón.

Al Dr. Alfonso Durán Moreno, por la ayuda constante y paciente que me brindó para poder elaborar bajo su dirección la presente tesis. Gracias.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por abrirme las puertas y darme la oportunidad de formar parte de ella y de ser profesionista.

A Dios por permitirme ser lo que soy.



**ÍNDICE**

**CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS.....7**

    1.1 INTRODUCCIÓN .....7

    1.2 OBJETIVOS ..... 10

        1.2.1 Objetivo General ..... 10

        1.2.2 Objetivos Específicos ..... 10

**CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....11**

    2.1 AGUAS RESIDUALES .....11

        2.1.1 Clasificación del agua residual ..... 11

        2.1.2 Características del agua residual ..... 12

    2.2 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL .....14

        2.2.1 Tratamiento primario ..... 14

        2.2.2 Tratamiento secundario..... 15

        2.2.3 Tratamiento Avanzado ..... 15

        2.2.4 Procesos involucrados en los sistemas de tratamiento de aguas residuales..... 16

        2.2.5 Acondicionamiento de lodos ..... 18

    2.3 APLICACIONES DEL AGUA RESIDUAL TRATADA.....21

        2.3.1 Reúso agrícola ..... 21

        2.3.2 Reúso industrial ..... 21

    2.4 SITUACIÓN DEL AGUA RESIDUAL EN MÉXICO .....22

        2.4.1 Normatividad regulatoria de la calidad del agua ..... 23

        2.4.2 Características del agua residual para reúso ..... 24

    2.5 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO .....26

**CAPÍTULO 3. TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES.....29**

    3.1 TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO.....29

        3.1.1 Características técnicas ..... 32

        3.1.2 Características ambientales ..... 34

        3.1.3 Aplicaciones ..... 35

        3.1.4 Ventajas y desventajas ..... 36

    3.2 LODOS ACTIVADOS .....37



3.2.1	Características técnicas .....	40
3.2.2	Características ambientales .....	43
3.2.3	Aplicaciones .....	43
3.2.4	Ventajas y desventajas .....	44
CAPÍTULO 4. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS.....		45
4.1	MÉTODO DE FENTON .....	45
4.1.1	Características técnicas .....	48
4.1.2	Características ambientales .....	50
4.1.3	Aplicaciones .....	52
4.1.4	Ventajas y desventajas .....	52
4.2	SISTEMAS SBR (REACTORES DISCONTINUOS SECUENCIALES).....	53
4.2.1	Características técnicas .....	55
4.2.2	Características ambientales .....	57
4.2.3	Aplicaciones .....	57
4.2.4	Ventajas y desventajas .....	58
4.3	SISTEMAS MBR (BIO-REACTORES DE MEMBRANA) .....	59
4.3.1	Características técnicas .....	61
4.3.2	Características Ambientales.....	63
4.3.3	Aplicaciones .....	64
4.3.4	Ventajas y desventajas .....	65
CAPÍTULO 5. COMPARACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL.....		68
5.1	PROCESOS BIOLÓGICOS.....	68
5.1.1	Comparación técnica.....	69
5.1.2	Comparación económica.....	72
5.1.3	Comparación ambiental .....	74
5.2	PROCESOS FISICOQUÍMICOS .....	76
5.2.1	Comparación técnica.....	76
5.2.2	Comparación económica.....	79
5.2.3	Comparación ambiental .....	79
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		83
BIBLIOGRAFÍA .....		87



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Características físicas, químicas y biológicas del agua residual y sus procedencias .....	12
Tabla 2.2	Normas Oficiales Mexicanas relativas a la calidad de agua residual.....	23
Tabla 2.3	Límites Máximos Permisibles de Contaminantes.....	24
Tabla 2.4	Calidad del agua requerida en agua para enfriamiento (sistemas de recirculación) .....	25
Tabla 2.5	Calidad del agua requerida para reúso de agua en calderas .....	26
Tabla 2.6	Procesos de tratamiento de agua utilizados en México (CNA, 2003) .....	28
Tabla 3.1	Características del lodo residual generado por el TPA .....	34
Tabla 3.2	Parámetros de diseño y operación de algunos procesos de lodos activados .....	41
Tabla 4.1	Características de los lodos generados con el método de Fenton .....	51
Tabla 5.1	Características técnicas (procesos biológicos) .....	70
Tabla 5.2	Estimados de inversión y costos para sistemas MBR y lodos activados....	73
Tabla 5.3	Características técnicas (procesos fisicoquímicos) .....	77
Tabla 5.4	Características de lodos generados en el TPA y el método de Fenton.....	80
Tabla 5.5	Resumen de las características más importantes de cada tecnología .....	81

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1	Procesos de tratamiento de aguas residuales .....	17
Fig. 2.2	Plantas de tratamiento de aguas municipales en operación en México .....	27
Fig. 3.1	Proceso de Coagulación-floculación .....	29
Fig. 3.2	Tratamiento primario avanzado .....	31
Fig. 3.3	Tren de tratamiento de aguas residuales propuesto con el sistema TPA .....	33
Fig. 3.4	Proceso de lodos activados convencional (flujo pistón) .....	39
Fig. 3.5	Proceso de lodos activados mezcla completa .....	39



Fig. 3.6 Diagrama de flujo de un proceso de lodos activados con tratamiento de lodos.....	42
Fig. 4.1 Proceso Fenton (reactor batch).....	47
Fig. 4.2 Tren de tratamiento de aguas residuales con el método de Fenton .....	50
Fig. 4.3 Operación de los reactores discontinuos secuenciales .....	54
Fig. 4.4 Sistema SBR con dos tanques de aireación en paralelo .....	55
Fig. 4.5 Tren de tratamiento de aguas residuales con un sistema SBR .....	56
Fig. 4.6 Tipos de bio-reactores de membrana. a)MBR externo, b)MBR interno .....	59
Fig. 4.7 Filtración de membrana .....	60
Fig. 4.8 Tren de tratamiento de aguas residuales con un sistema MBR externo .....	62
Fig. 4.9 Tren de tratamiento de aguas residuales con un sistema MBR interno .....	62
Fig. 5.1 Curva de crecimiento bacteriano en términos de masa de microorganismos.....	75





## RESUMEN

El presente estudio está enfocado al análisis y comparación de las características técnicas, económicas y ambientales más importantes de tecnologías de aguas residuales basadas en procesos biológicos y fisicoquímicos, cuyo objetivo principal es generar agua tratada para reúso agrícola e industrial.

Dentro de las tecnologías basadas en procesos biológicos se estudiaron los sistemas de lodos activados (convencional y aireación extendida), sistemas de reactores discontinuos secuenciales y sistemas de bio-reactores de membrana. Los sistemas basados en procesos fisicoquímicos que se analizaron son el tratamiento primario avanzado y el método Fenton.

Las características técnicas que se tomaron en cuenta para este estudio son la operación y eficiencia de cada tecnología así como el equipo principal necesario para llevar a cabo el proceso de tratamiento de agua. En cuanto al aspecto ambiental se reportan algunas de las características de los residuos generados con cada tratamiento siempre que esto fue posible, así como los diferentes tipos de tratamiento a los que éstos pueden ser sometidos antes de su disposición final. Finalmente, al análisis económico se limita sólo a los costos de instalación y operación de las plantas de tratamiento que fueron previamente estimados dentro de proyectos desarrollados en la Facultad de Química de la UNAM y en otros casos, reportados en la literatura.

Las alternativas más eficientes en cuanto a la calidad de efluente producido son el sistema MBR y el método Fenton al generar efluentes desinfectados. En cuanto al tamaño de la superficie requerida para cada tecnología depende de la cantidad de agua que se desee tratar, pero los sistemas que requieren poco espacio son los sistemas MBR y SBR. Entre el tratamiento primario avanzado y el método Fenton la diferencia más significativa es que este último oxida la materia orgánica y ofrece un efecto desinfectante.



Las tecnologías en las que predomina el proceso biológico generan una gran cantidad de lodo residual, pero dentro de éstas el sistema que genera menor cantidad de lodos es el sistema de aireación extendida. Entre los sistemas con procesos fisicoquímicos, la tecnología que genera una menor cantidad de sólidos residuales es el método Fenton, que genera alrededor de 10% menos cantidad de lodo que el tratamiento primario avanzado.



## CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS

### 1.1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional y el desarrollo industrial en la ciudad de México han producido efectos que degradan el ambiente y deterioran sus recursos, como el de la contaminación del agua, que ha dado lugar a mayores riesgos en la salud y a un deterioro de la calidad de vida de la población.

Las normas ambientales vigentes en México establecen las características y la calidad que debe tener el agua residual tratada en función del uso que se le dará, así como de su origen. Con base en ellas se diseñan las instalaciones depuradoras partiendo de la caracterización del efluente (determinación de la calidad y cantidad) y del uso y destino que tendrá el agua residual tratada ya que de esta forma se determina la extensión del tratamiento (Millán, 2005).

En México la mayor parte de las aguas residuales municipales son empleadas en el riego agrícola no directamente después de ser sometidas a tratamiento sino indirectamente desde los cursos de aguas superficiales, cuyos caudales durante la estación seca son en gran parte de aguas residuales (Jiménez, 1999).

En los ríos, por efecto de la dilución y depuración se produce cierta disminución en la carga contaminante presente en las aguas residuales. Esta situación no es del todo negativa, pues estudios que comparan el resultado del uso de aguas limpias y negras en productos agrícolas han indicado que el agua residual incrementa hasta en 150 por ciento la productividad en el maíz y 100 por ciento la del jitomate (Jiménez, 2002). Esto se debe a que las aguas negras municipales contienen materia orgánica, nitrógeno y fósforo, que sirven como fertilizantes naturales.



La Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció que el principal riesgo en el empleo de agua residual para riego agrícola es la diseminación de parásitos (Jiménez, 2002). En el Instituto Nacional de Salud Pública se demostró que la principal diseminación presente en nuestras aguas residuales es de *helmintos* (lombrices parasitarias).

Las técnicas utilizadas para la depuración de aguas residuales no distinguen ni separan fácilmente un patógeno de la materia orgánica. Por esta razón, si el objetivo del tratamiento del agua residual es el reúso en riego agrícola, es necesario contar con una tecnología que permita eliminar completamente los patógenos afectando lo menos posible la concentración de materia orgánica y elementos como nitrógeno y fósforo, de manera que las cantidades de estos compuestos sean suficientes para fertilizar los suelos.

A lo largo del tiempo se han diseñado diferentes sistemas de depuración de aguas residuales con el fin de eliminar sus contaminantes mediante su separación, transformación o degradación. Estos sistemas de depuración pueden ser físicos, fisicoquímicos o biológicos. El tratamiento de aguas residuales con lodos activados es uno de los tratamientos biológicos típicos más utilizados en la actualidad en nuestro país. Con el afán de eficientar este sistema se ha desarrollado el proceso de lodos activados utilizando reactores discontinuos secuenciales (SBR).

Dentro de los procesos fisicoquímicos convencionales utilizadas en México para el tratamiento de aguas residuales se encuentra el sistema de tratamiento primario avanzado el cual se basa en el proceso de coagulación-floculación.

Gracias al desarrollo de nuevas tecnologías actualmente existen otras alternativas de tratamiento de aguas residuales cuyo objetivo principal es mejorar la calidad del efluente y eficientar el proceso. Un ejemplo son los procesos fisicoquímicos avanzados como los denominados "procesos de oxidación avanzada" y "procesos de membrana".



El método de Fenton forma parte de los procesos de oxidación avanzada y se ha demostrado que es altamente eficiente en el tratamiento de afluentes con compuestos recalcitrantes, tóxicos o no biodegradables. Otro tipo importante de tecnologías alternas son los procesos de membrana, entre ellos se encuentra el sistema de bio-reactores de membrana (MBR por sus siglas en inglés de *Membrane Bioreactor*), el cual tiene entre otras aplicaciones, la purificación de agua potable, produciendo un efluente 75% más limpio que el generado por los tratamientos biológicos tradicionales (Sims, 2003).

En México existen 1,360 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales construidas pero de éstas sólo 1,182 se encuentran en operación. En éstas se utilizan diversas tecnologías de tratamiento siendo los lodos activados la que cuenta con una mayor capacidad de operación (24,393.35 L/s) y con 259 plantas. El tratamiento primario avanzado es utilizado en tan solo 16 plantas en operación, las cuales tratan 8,940.80 L/s de agua residual (CNA, 2003). No se tienen registros de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales que operen con la tecnología del método Fenton ni MBR.

En la Universidad Nacional Autónoma de México se han realizado estudios de diversas opciones para tratamiento de aguas residuales como los tratamientos fisicoquímicos, biológicos, de oxidación avanzada, entre otros.

Dentro de estos estudios se incluyen los realizados en el Instituto de Ingeniería y en la Facultad de Química, en donde se ha demostrado que las tecnologías de lodos activados convencional (biológico) y tratamiento primario avanzado (fisicoquímico) generan un efluente que, después de un proceso de desinfección, cuenta con la calidad requerida para su reúso en riego agrícola, mientras que el método Fenton (oxidación avanzada) genera un efluente que no requiere del proceso de desinfección después del tratamiento (González, 2001, Durán *et al*, 2003).



Con base en esta información y teniendo en cuenta que cada una de estas tecnologías son procesos diferentes entre sí, con variables de operación distintas y que requieren de reactivos y equipo específicos según el proceso de tratamiento, el presente estudio se enfoca en el análisis técnico, económico y ambiental de las tecnologías de todos activados convencional, sistema SBR, tratamiento primario avanzado, método de Fenton y sistema MBR, determinando sus ventajas y desventajas, que al ser comparadas permitirán evaluar las características de cada una.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo General

Comparar las características técnicas, económicas y ambientales de tres tecnologías de tratamiento de aguas residuales basadas en procesos biológicos (bio-oxidación de contaminantes), y de dos tecnologías basadas en procesos fisicoquímicos (coagulación-floculación y oxidación avanzada).

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Definir las características generales de cinco tecnologías, tres basadas en procesos biológicos y dos en procesos fisicoquímicos, para el tratamiento de aguas residuales municipales con fines de reúso.
- Comparar estudios experimentales con aguas residuales, de cada una de estas cinco tecnologías.
- Determinar los casos en los que cada tecnología es recomendada.



## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 AGUAS RESIDUALES

Se define como aguas residuales a “las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas” (NOM-001-SEMARNAT-96). Las aguas residuales municipales son líquidos generados por la comunidad una vez que el agua ha sido contaminada durante los usos para los cuales ha sido empleada y es evacuada mediante redes sanitarias de alcantarillado (Metcalf y Eddy, 1996).

Debido al impacto negativo que ha tenido la descarga de aguas sobre los cuerpos de agua receptores y terrenos, en México se ha incrementado el interés en regular la calidad y evacuación de efluentes residuales con el fin de minimizar el daño al medio ambiente y a la salud pública.

#### 2.1.1 Clasificación del agua residual

El agua residual en general presenta una composición que depende del origen de las descargas así como del sistema de recolección que se emplee. Las aguas residuales son principalmente:

- **Domésticas:** Provenientes de zonas residenciales o instalaciones comerciales públicas y similares. Son el resultado de las actividades cotidianas de las personas, éstas contienen en su mayoría desechos de origen orgánico e inorgánico, por lo que la contaminación consiste principalmente en sólidos suspendidos, materia orgánica, acidez, grasas y aceites, restos de comida, jabón y detergentes así como productos químicos como lo son el cloro y amoníaco (Metcalf y Eddy, 1996).



- **Industriales:** Provenientes del uso en fábricas o empresas que realicen la extracción, conservación o transformación de materias primas o minerales, el acabado de productos o la elaboración de satisfactores, así como la que se utiliza en parques industriales, en calderas, en dispositivos para enfriamiento, lavado, baños y otros servicios dentro de la empresa (Reglamento de la ley de aguas nacionales, 1994).
- **Agrícolas:** Provenientes del uso en siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas ( Reglamento de la ley de aguas nacionales, 1994).
- **Pluviales:** son aquéllas que provienen de lluvias, se incluyen las que proviene de nieve y granizo (NOM-001-SEMARNAT-96).

La mayor parte de las aguas residuales provienen del uso doméstico e industrial, aunque los componentes dependen de las características particulares de la zona, del sistema de recolección y de la época del año. Las aguas residuales municipales son aquellas procedentes del uso doméstico, comercial e industrial.

### 2.1.2 Características del agua residual

En general, las aguas se caracterizan por sus propiedades físicas, químicas y biológicas. A continuación se enlistan los principales constituyentes de éstas.

**Tabla 2.1. Características físicas, químicas y biológicas del agua residual y sus procedencias (Metcalf y Eddy, 1996).**

Características	Procedencia
Propiedades físicas	
Color	Aguas residuales domésticas e industriales, degradación natural de materia orgánica
Olor	Agua residual en descomposición, residuos industriales
Sólidos	Agua de suministro, aguas residuales domésticas e industriales, erosión del suelo, infiltración y conexiones incontroladas.
Temperatura	Aguas residuales domésticas e industriales.





---

### Constituyentes químicos

#### Orgánicos

Carbohidratos	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Grasas animales, aceites y grasa	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Plaguicidas	Residuos agrícolas.
Fenoles	Vertidos industriales.
Proteínas	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Compuestos orgánicos volátiles	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Otros	Degradación natural de materia orgánica.

#### Inorgánicos

Alcalinidad	Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea.
Cloruros	Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea.
Metales pesados	Vertidos industriales.
Nitrógeno	Residuos agrícolas y aguas residuales domésticas.
pH	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Fósforo	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales; aguas de escorrentía.
Contaminantes prioritarios	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Azufre	Agua de suministro; aguas residuales domésticas, comerciales e industriales.

#### Gases

Sulfuro de hidrógeno	Descomposición de residuos domésticos.
Metano	Descomposición de residuos domésticos.
Oxígeno	Agua de suministro; infiltración de agua superficial.

### Constituyentes biológicos

Animales	Cursos de agua y plantas de tratamiento.
Plantas	Cursos de agua y plantas de tratamiento.
Protistas:	
Eubacterias	Aguas residuales domésticas, infiltración de agua superficial, plantas de tratamiento.
Arqueobacterias	Aguas residuales domésticas, infiltración de agua superficial, plantas de tratamiento.
Virus	Aguas residuales domésticas

---



## **2.2 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL**

Los procesos empleados en las plantas depuradoras de aguas residuales suelen clasificarse como tratamientos primarios, secundarios y terciarios, los cuales son constituidos por un conjunto de operaciones y procesos unitarios.

Las operaciones unitarias son métodos de tratamiento basados en fenómenos físicos, mientras que los procesos unitarios se basan en procesos químicos o biológicos (Metcalf y Eddy, 1996).

Los métodos de tratamiento en los que predominan la aplicación de principios físicos se conocen como tratamientos primarios. Los métodos de tratamiento en los que la eliminación de contaminantes se efectúa por actividad química o biológica son conocidos como tratamientos secundarios. Recientemente el término tratamiento terciario se ha aplicado a las operaciones o procesos utilizados para eliminar contaminantes que no se han visto afectados por los tratamientos antes mencionados (Ramalho, 1982).

### **2.2.1 Tratamiento primario**

En el tratamiento primario los cambios en las características y propiedades del agua se realizan mediante a operaciones físicas como la sedimentación y debaste con el fin de eliminar sólidos sedimentables y flotantes presentes en el agua residual (Metcalf y Eddy, 1996) ya que estos materiales podrían atascar o dañar el equipo (las bombas y la maquinaria en general). Este tratamiento constituye la base de la mayoría de los procesos de depuración de aguas residuales.



### 2.2.2 Tratamiento secundario

Una vez eliminados de un 40 a un 60% de los sólidos en suspensión y reducida de un 20 a un 40% la DBO por medios físicos en el tratamiento primario, el tratamiento secundario reduce la cantidad de materia orgánica en el agua (Ruiz *et al.*, 2004)

En el tratamiento secundario se emplean procesos químicos y/o biológicos. En los procesos fisicoquímicos las transformaciones se realizan mediante reacciones químicas y en la mayoría de los casos son procesos aditivos, es decir, la eliminación de un contaminante se logra por medio de la adición de otra sustancia.

El objetivo de los procesos biológicos es la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica (Metcalf y Eddy, 1996). Los procesos de tratamiento biológico se pueden dividir según el estado en que se encuentren las bacterias responsables de la degradación. La biomasa bacteriana puede estar soportada sobre superficies inertes tales como rocas, material cerámico o plástico, o puede estar suspendida en el agua a tratar.

En cada una de estas situaciones la concentración de oxígeno en el agua determina la existencia de bacterias aerobias, facultativas o anaerobias. En presencia de oxígeno, las bacterias aerobias convierten la materia orgánica en formas estables, como CO<sub>2</sub>, agua, nitratos y fosfatos, así como otros materiales orgánicos.

### 2.2.3 Tratamiento Avanzado

Se define como tratamiento avanzado al tratamiento adicional necesario para la eliminación de los sólidos suspendidos y de las sustancias disueltas que permanecen en el agua residual después del tratamiento secundario. Es utilizado para obtener un grado de tratamiento mayor que el que el que aportar el proceso secundario.



Hay procesos que permiten eliminar más de un 99% de los sólidos en suspensión y reducir la DBO en similar medida. Por ejemplo, la eliminación del amoníaco, la desnitrificación y la precipitación de los fosfatos requieren del tratamiento avanzado.

#### **2.2.4 Procesos involucrados en los sistemas de tratamiento de aguas residuales**

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales pueden basarse en procesos físicos, fisicoquímicos y biológicos. La figura 2.1 muestra la clasificación de los procesos en los que se basan los distintos sistemas de tratamiento de aguas residuales así como algunos ejemplos de éstos.

Los procesos físicos utilizados en el tratamiento de aguas residuales son el cribado, desarenado, flotación, sedimentación y filtración. Este tipo de procesos forman parte del tratamiento primario, que generalmente es la base del tratamiento completo del agua residual y por esta razón también es llamado “pretratamiento”, ya que generalmente después de éstos se aplica el tratamiento secundario biológico o fisicoquímico. En la mayoría de los casos algunos de estos procesos (la filtración por ejemplo) también son utilizados después del tratamiento secundario con el fin de mejorar la calidad del efluente .

Los procesos fisicoquímicos y los procesos biológicos forman parte comúnmente del tratamiento secundario aunque en algunas ocasiones son utilizados como pretratamiento.

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales pueden involucrar más de un proceso. Dentro del tratamiento primario pueden utilizarse varias operaciones unitarias como el cribado y la sedimentación, dependiendo de las características requeridas del efluente. El tratamiento secundario se lleva a cabo mediante procesos biológicos, fisicoquímicos o una combinación de éstos.

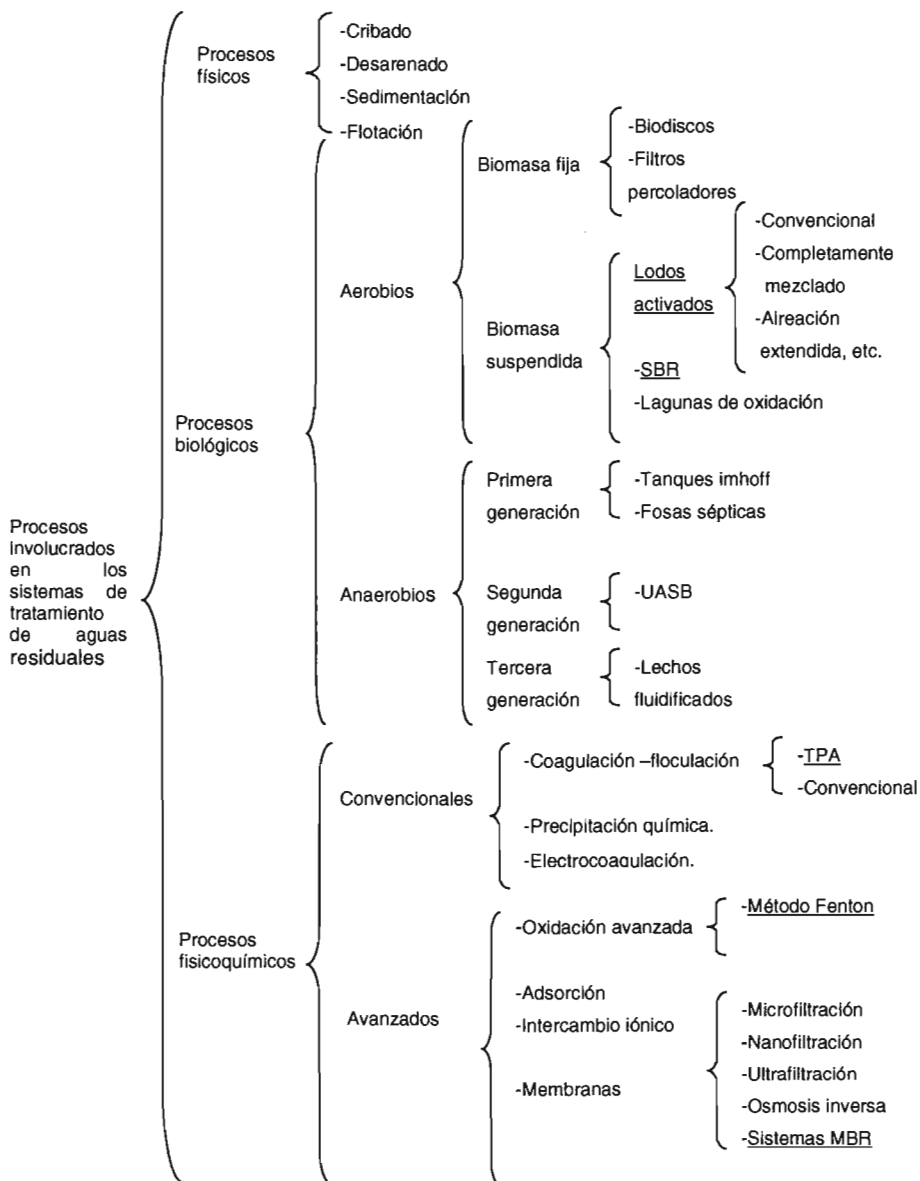


Figura 2.1. Procesos de tratamiento de aguas residuales.



Existen procesos de depuración de aguas residuales que son comúnmente utilizados en las plantas de tratamiento que existen en México como los procesos biológicos convencionales y algunos procesos fisicoquímicos. Aunque los procesos biológicos y fisicoquímicos convencionales son efectivos en la remoción de una gran cantidad de contaminantes, generalmente ésta no es suficiente, de tal manera que el efluente de estos procesos requiere de un postratamiento que, dependiendo de la eficiencia del tratamiento secundario, puede constar de varias operaciones adicionales lo cual incrementa el costo de la operación así como el área de instalaciones requerida .

Debido a la necesidad de eficientar al máximo estas tecnologías y mejorar la calidad del efluente se han realizado varias modificaciones a algunas tecnologías convencionales e incluso se han desarrollado nuevos sistemas de tratamiento.

En el presente estudio se analizaron los sistemas de lodos activados y tratamiento primario avanzado como sistemas de tratamiento de agua tradicionales, ya que son de los más utilizados en México actualmente. Mientras que como tecnologías modernas se analizaron los sistemas de reactores discontinuos secuenciales, los sistemas con bio-reactores de membranas y el método de Fenton. Las primeras dos tecnologías son modificaciones del proceso biológico de lodos activados, mientras que en el método de Fenton y en el TPA está presente el fenómeno coagulación-floculación.

### **2.2.5 Acondicionamiento de lodos**

Cualquier tecnología de tratamiento de aguas residuales conlleva a la producción de lodos que deben purgarse del proceso. El lodo que se genera en las operaciones y procesos de tratamiento de aguas residuales es generalmente líquido o semilíquido (Metcalf y Eddy, 1996). Dependiendo del tratamiento del cual provenga el lodo residual, éste puede presentar una alta capacidad de putrefacción que provoca desprendimiento de malos olores y atrae organismos causantes de enfermedades como las ratas y los mosquitos, lo cual constituye un riesgo para la salud pública.



El lodo producido en los tratamientos biológicos (lodos activados, sistemas SBR y MBR) tiene generalmente una apariencia floculante de color marrón. Cuando éste es muy oscuro puede estar próximo a volverse séptico pero si es más claro de lo normal, puede haber estado aireado insuficientemente y los sólidos tienen tendencia a sedimentar lentamente.

El lodo en buenas condiciones tiene un olor a tierra que no resulta molesto pero tiende a convertirse en séptico con bastante rapidez y luego adquiere olor desagradable (Metcalf y Eddy, 1996). Los lodos producidos por un tratamiento biológico son altamente fermentables, contienen una gran cantidad de microorganismos (bacterias y patógenos) además de tener un olor muy desagradable (Degrémont, 1979).

Las características del lodo que se genera en los tratamientos fisicoquímicos (TPA y método de Fenton) dependen de los compuestos químicos que se utilicen. Si la precipitación química se lleva a cabo con sales metálicas el color de los lodos es oscuro, aunque su superficie puede ser color rojo si contiene mucho hierro. Los hidratos de hierro y aluminio contenidos en el lodo lo hacen gelatinoso (Degrémont, 1979).

El tratamiento de los lodos de desecho tiene la finalidad de remover materia orgánica (medido como sólidos volátiles), metales, compuestos orgánicos tóxicos, agua, patógenos y parásitos presentes en éstos así como disminuir su putrefacción de manera que los lodos estabilizados puedan utilizarse como mejoradores de suelos de acuerdo con la norma mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, o puedan desecharse sin mayor peligro.

El lodo producido en el tratamiento de aguas residuales municipales puede ser utilizado para el acondicionamiento de la tierra ya que mejora sus propiedades de retención del agua lo cual beneficia a los cultivos de flores, árboles, pasto (Degrémont, 1979). Por esta razón es importante definir el tratamiento que se le dará a los lodos generados.



Los procesos más usuales de tratamiento de lodos son el espesado, digestión y deshidratación de lodos. El tratamiento de lodos se elige según las características de los mismos y del destino final.

El espesado de lodos tiene el objetivo de incrementar el contenido de sólidos del lodo eliminando parte de la fracción líquida del mismo, reduciendo así el volumen del lodo. Este proceso se lleva a cabo mediante procedimientos físicos. Este proceso resulta benéfico ya que al reducir el volumen de los lodos, entre otras ventajas, se reduce el tamaño de las conducciones así como los costos de bombeo.

El proceso de estabilización tiene varios objetivos como lo son la reducción de la presencia de patógenos, la eliminación de olores desagradables y la reducción, inhibición o eliminación de su potencial de putrefacción. Estas características se generan debido a la proliferación de microorganismos sobre la fracción orgánica del lodo residual. Para eliminar estas condiciones, los medios de estabilización que se utilizan son la reducción biológica de la materia orgánica o volátil (digestión aerobia o anaerobia), la oxidación química de la materia volátil, la adición de agentes químicos que no favorezcan la supervivencia de los microorganismos (estabilización con cal) y la aplicación de calor con el objetivo de desinfectar o esterilizar el lodo.

La deshidratación de lodos implica la reducción del contenido de humedad del lodo, lo cual representa varias ventajas como la disminución de los costos de transporte, el facilitar su manipulación, evitar la generación de olores y la putrefacción de lodos, reducir la producción de lixiviados en la zona donde éstos se viertan, etc. Los medios físicos utilizados para este fin son la filtración, el prensado, la acción capilar, la extracción por vacío y la separación y compactación por centrifugación.





## 2.3 APLICACIONES DEL AGUA RESIDUAL TRATADA

Como consecuencia de la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, y del crecimiento poblacional, se han buscado nuevas fuentes de recursos hídricos. Se ha encontrado que las aguas residuales tratadas pueden ser una fuente que permita el ahorro en el consumo de este recurso vital.

### 2.3.1 Reúso agrícola

El riego agrícola es una de las actividades que consumen una gran cantidad de agua. La mayor parte de las aguas municipales colectadas en la Ciudad de México se emplean para riego agrícola y en la mayoría de los casos no han sido sometidas a ningún tratamiento de depuración (Jiménez *et al.*, 1999). Varios aspectos de las prácticas actuales de uso y disposición de aguas residuales implican un gran riesgo para la salud; un riesgo directo para los agricultores e indirecto para el público en general que consume los productos agrícolas regados con aguas residuales. Por esta razón el uso del agua residual tratada es una alternativa viable para el riego agrícola ya que minimiza los riesgos a la salud pública al tener una concentración de materia orgánica, patógenos y compuestos tóxicos además de conservar sus cualidades nutrimentales que resultan benéficas para los cultivos.

### 2.3.2 Reúso industrial

Las aguas residuales tratadas se han utilizado también dentro de la industria principalmente como aporte a calderas y a torres de enfriamiento, esto es debido a que el agua utilizada con este fin es de una calidad independiente de la que requiere la industria a la que sirven estos equipos. Las torres de enfriamiento representan una parte importante del agua consumida por muchas industrias. Por ejemplo, en las industrias de producción de energía eléctrica y refinerías de petróleo, el agua de aporte a torres de enfriamiento pueden representar entre una cuarta parte y la mitad del



consumo total de agua. También se requiere una gran cantidad de agua para generar vapor para intercambiadores de calor mediante calderas (Metcalf y Eddy, 1996). El agua utilizada debe cumplir con ciertos requisitos de calidad para evitar problemas y fallas en las instalaciones, los principales parámetros son los contaminantes orgánicos sólidos o disueltos, contaminantes inorgánicos y el pH (Jiménez, 2001).

### 2.4 SITUACIÓN DEL AGUA RESIDUAL EN MÉXICO

En México, la gestión del agua es un tema prioritario y la depuración de las aguas residuales debe ser empleada como una herramienta de gestión con el fin de controlar y prevenir la contaminación. El interés, por parte de las autoridades, de regular la reutilización de aguas residuales con objeto de impedir problemas sanitarios y medioambientales ha permitido establecer una serie de criterios. Un ejemplo del marco normativo es la NOM-001-SEMARNAT-1996 en materia de descarga de aguas residuales, en la que establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. No obstante lo anterior, y a pesar de los esfuerzos realizados, un alto porcentaje de las descargas que se efectúan en la actualidad son de aguas residuales municipales e industriales sin tratamiento, lo que implica la necesidad de invertir más para poder llevar a cabo un control de las descargas (Millán, 2004).

La falta de tratamiento de las aguas residuales provoca la contaminación de las corrientes receptoras, así como de los cuerpos de agua lo cual genera un fuerte impacto económico, ya que este tipo de agua pierde la mayoría de sus usos potenciales y queda limitada exclusivamente para riego y, en casos excepcionales, para la generación de energía. Aún cuando el riego con aguas residuales es posible bajo ciertas circunstancias, actualmente se lleva a cabo casi sin control alguno, ni en la calidad de las aguas residuales (que debieron ser tratadas), ni del tipo de cultivo a regar. Varios aspectos de las prácticas actuales de uso y disposición de aguas residuales implican un gran riesgo para la salud.



Estas prácticas son responsables de muchas de las enfermedades endémicas asociadas con bacterias patógenas y otros microorganismos. El otro peligro a largo plazo es la posible concentración de elementos tóxicos en los suelos agrícolas; especialmente plomo, cadmio, mercurio y zinc; y posiblemente también boro y litio. Este es un peligro potencial serio, sobre todo cuando se encuentran presentes en las aguas residuales ciertos tipos de efluentes industriales de alta toxicidad.

### 2.4.1 Normatividad regulatoria de la calidad del agua

Las aguas residuales tratadas deben que cumplir normas específicas de calidad antes de que puedan descargarse a una corriente de agua o volverse a usar.

A continuación se enlistan las normas oficiales mexicanas relativas a la calidad de agua residual y tratada así como al tratamiento que debe darse a los lodos que se producen en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

**Tabla 2.2. Normas Oficiales Mexicanas relativas a la calidad de agua residual.**

Norma	Objetivo	Publicación en el DOF
NOM-001-SEMARNAT-96	Límites permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales	06-01-97
NOM-002-SEMARNAT-96	Límites permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales en los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal	03-06-98
NOM-003-SEMARNAT-97	Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reutilicen en servicios al público	21-09-98
NOM-004-SEMARNAT-02	Límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes del alcantarillado urbano o municipal, plantas potabilizadoras y plantas de tratamiento de aguas residuales, para posibilitar su aprovechamiento o disposición final.	15-08-03



### 2.4.2 Características del agua residual para reúso

Las características del agua residual tratada para reúso dependen de éste. Los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas para reúso son los establecidos en la Normas Oficiales Mexicanas NOM-001-SEMARNAT-96 y NOM-003-SEMARNAT-97. En la tabla 2.3 se muestran algunos de éstos.

**Tabla 2.3. Límites Máximos Permisibles de Contaminantes.**

TIPOS DE REUSO	PROMEDIO MENSUAL				
	Coliformes fecales NMP/100 mL	Huevos de Helmintos (H-H/L)	Grasas y aceites m/L	DBO <sub>5</sub> mg/L	SST mg/L
SERVICIOS AL PUBLICO CON CONTACTO DIRECTO	240	≤ 1	15	20	20
SERVICIOS AL PUBLICO CON CONTACTO INDIRECTO U OCASIONAL	1,000	≤ 5	15	30	30

El reúso industrial de agua tratada es principalmente en torres de enfriamiento y calderas. En la Tabla 2.4 se muestran los límites máximos de contaminantes en el agua de reúso en sistemas de enfriamiento.

El efluente tratado deberá reducir al mínimo cualquier problema que afecte la eficiencia de transferencia de calor en los sistemas de enfriamiento, como son:

- Incrustación: Debida a la precipitación de carbonato de calcio, sulfato de calcio, dióxidos de sílice, entre otros.
- Corrosión: Local o general, ocasionada por la cantidad de oxígeno, pH, CO<sub>2</sub>, salinidad, temperatura, grado de recirculación, contacto entre metales y el ambiente. Estos parámetros no pueden considerarse individualmente dado que rara vez cambian de manera independiente, además de que tienen efectos opuestos sobre la corrosión.



- Crecimiento biológico y ensuciamiento: Ocasionado por compuestos que forman depósitos fácilmente, como son: Sólidos suspendidos, materia coloidal, materia orgánica, algas, bacterias, hongos y levaduras, fugas de HC de proceso, entre otros.
- Generación de espumas: Debida principalmente por uso excesivo de agentes demulsificantes, determinados agentes floculantes orgánicos y por la presencia de surfactantes aniónicos o catiónicos.

**Tabla 2.4. Calidad del agua requerida en agua para enfriamiento (sistemas de recirculación).**

PARÁMETRO*	WPCF 1989	EPA 1992	DGCOH 1987
Alcalinidad (CaCO <sub>3</sub> )	350	---	300
Aluminio	0.1	---	1.0
Bicarbonato	24	---	---
Calcio	50	---	---
Cloro residual	---	1	0.2
Cloruro	500	---	---
Colif. Fec. (org/100mL)	---	≤200	---
Colif. Tot. (org/100mL)	---	---	10,000
DBO	25	≤30	20
DQO	75	---	75
Dureza (CaCO <sub>3</sub> )	650	---	325
Fosfatos	4	---	1.0
Hierro	0.5	---	0.5
Magnesio	0.5	---	---
Manganeso	0.5	---	0.5
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1.0	---	0.5
pH, unidades	6.9-9.0	6-9	5-8.3
SDT	500	---	1,200
Sílice	50	---	---
SST	100	≤30	500
Sulfato	200	---	700
Turbiedad	50	---	10

\*Salvo indicación expresa, las unidades son mg/L y los valores indican los valores que no se deben superar en condiciones normales. Ningún agua debe contener todos los valores máximos indicados (Metcalfe y Eddy 1996). WPCF: Water Pollution Control Federation, DGCOH: Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, EPA: Environmental Protection Agency.



En la Tabla 2.5 se muestran los límites máximos de contaminantes del agua para la generación de vapor.

**Tabla 2.5. Calidad del agua requerida para reúso de agua en calderas.**

PARÁMETRO*	BAJA PRESIÓN (<11.6 kg/cm <sup>2</sup> )	PRESIÓN INTERMEDIA (11.6-50.2 kg/cm <sup>2</sup> )	ALTA PRESIÓN (>50.2 kg/cm <sup>2</sup> )
Alcalinidad (CaCO <sub>3</sub> )	350	100	40
Aluminio	5	0.1	0.01
Bicarbonato	170	120	48
Calcio	--	0.4	0.01
Cobre	0.5	0.05	0.05
DQO	--	5	1.0
Dureza (CaCO <sub>3</sub> )	350	1.0	0.07
Hierro	1	0.3	0.05
Magnesio	<sup>a</sup>	0.25	0.01
Manganeso	0.3	0.1	0.01
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.1	0.1	0.1
Oxígeno disuelto	2.5	0.007	0.0007
pH, unidades	7-10	8.2-10	8.2-9
SDT	700	500	200
Sílice	30	10	0.7
SST	10	5	0.5
Zinc	0.01	0.01	--

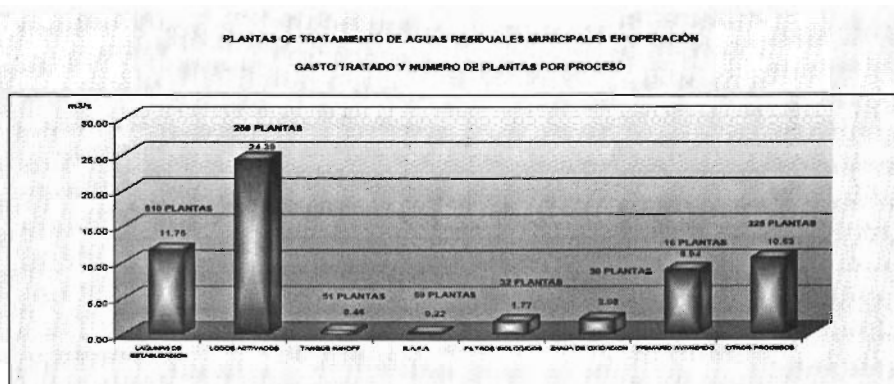
\* Salvo indicación expresa, las unidades son mg/L y los valores indican los valores que no se deben superar en condiciones normales. Ningún agua debe contener todos los valores máximos indicados (Metcalf y Eddy 1996).

## 2.5 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO

Las aguas residuales tratadas son aquellas que mediante procesos individuales o combinados de tipo físicos, químicos, biológicos u otros, se han adecuado para hacerlas aptas para su reúso en servicios al público. En México entre el 27% y 30% del caudal de aguas residuales generado a nivel nacional es tratado, mientras que aproximadamente el 70% es vertido a los cuerpos de agua sin tratar. Esto se debe a que los procesos de tratamiento son costosos en la operación y mantenimiento de las plantas, más que en su construcción.



Actualmente, el 15% de las plantas de tratamiento de agua existentes en nuestro país se encuentran fuera de operación. De acuerdo con datos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales en Operación, Diciembre 2003), México cuenta con 1,360 plantas de tratamiento de agua y sólo 1,182 se encuentran en operación, las cuales cuentan con una capacidad instalada total de 84,331.48 L/s y una capacidad de operación total de 60,242.55 L/s.



**Figura 2.2. Plantas de tratamiento de aguas municipales en operación en México (CNA, 2003).**

El Distrito Federal cuenta con 30 plantas de tratamiento de aguas residuales en operación con un gasto instalado de 6,809 L/s y un gasto de operación de 3,790 L/s. El 50 % de estas plantas utiliza el tratamiento de lodos activados, el 33.3% lodos activados convencional, el 3.3% tratamiento primario avanzado, el 3.3% tratamientos fisicoquímicos y el 10% otros tratamientos.

A continuación se enlistan los tipos de tratamientos de agua residual que se llevan a cabo en México en donde se aprecia que los sistemas de tratamiento con que cuenta el país tienen gran variedad de procesos, pero los más empleados son las lagunas de oxidación y lodos activados.



Tabla 2.6. Procesos de tratamiento de agua utilizados en México (CNA, 2003).

Proceso	Plantas		Capacidad Instalada		Capacidad de Operación	
	No.	%	L/s	%	L/s	%
Biodiscos	8	0.7	754.00	0.9	548.00	0.9
Dual	3	0.3	3,300.00	3.9	2,863.70	4.8
Filtros Biológicos	32	2.7	2,297.00	2.7	1,766.80	3.0
Laguna de estabilización	510	42.8	16,014.08	19.0	11,757.90	19.5
Lagunas aireadas	12	1.0	5,487.00	6.5	3,977.60	6.6
Lodos activados	259	22.0	36,238.80	43.2	24,393.35	40.7
Primario	13	1.1	3,171.60	3.8	2,465.20	4.1
Primario avanzado	16	1.4	11,235.00	13.4	8,940.80	14.9
RALLFA*	59	5.0	1,455.60	1.7	215.00	0.4
Reactor enzimático	35	3.0	89.70	0.1	68.70	0.1
Tanque Imhoff	51	4.3	666.50	0.8	459.00	0.7
Tanque séptico	65	5.5	368.1	0.4	248.50	0.4
Humedales artificiales	48	4.1	302.90	0.4	205.60	0.3
Zanjas de oxidación	30	2.6	2,618.00	3.1	2,078.60	3.5
Otros	41	3.5	333.20	0.4	253.80	0.4
Total	1,182		84,331.48		60,242.55	

\*Reactores anaeróbicos de lecho de lodos de flujo ascendente.

Las lagunas de estabilización cuentan con 510 plantas y lodos activados con 259. En contraste, la plantas de lodos activados cuentan con una mayor capacidad instalada y de operación que las lagunas de estabilización. Entre estos dos procesos se tiene el 64% de las plantas de tratamiento del país (CNA, 2003).

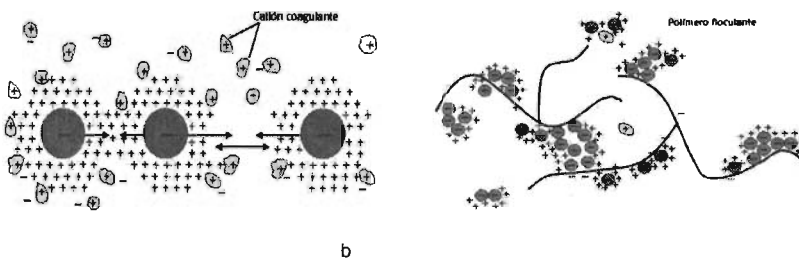




## CAPÍTULO 3. TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES

### 3.1 TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO

El proceso de coagulación es la desestabilización de partículas coloidales causada por la adición de un reactivo químico que produce la aglomeración de la materia coloidal. La adición de sales coagulantes como sulfato de aluminio, sulfato férrico o cloruro férrico, produce cationes poliméricos tales como  $[Al_13O_4(OH)_{24}]^{7+}$  y  $[Fe_3(OH)_4]^{5+}$  cuyas cargas positivas neutralizan las cargas negativas de los coloides, permitiendo que las partículas se unan formando aglomerados pequeños denominados flóculos (Degrémont, 1979). La reunión de flóculos pequeños en conglomerados mayores se denomina floculación y se lleva a cabo con ayuda de polímeros polielectrolíticos, que permiten la decantación a velocidades altas de sedimentación.



**Figura 3.1. Proceso de coagulación-floculación. a) Coagulación, b) Floculación.**

El tratamiento primario avanzado (TPA), es un tratamiento fisicoquímico que implica los procesos de coagulación-floculación y sedimentación, alterando el estado físico de los sólidos disueltos y en suspensión presentes en el efluente.

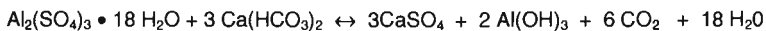
La sustancia coagulante (sulfato de aluminio o cloruro férrico) junto con pequeñas cantidades de un floculante (polímero aniónico), son añadidos en pequeñas dosis al efluente a tratar.



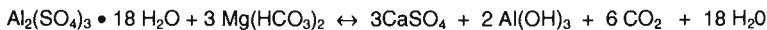
Con el desarrollo de polímeros se permite utilizar dosis bajas de cloruro férrico o sulfato de aluminio obteniendo excelentes remociones de SST y DBO<sub>5</sub>, y disminuyendo la generación de lodos (Shao *et al.*, 1996). Este proceso reduce aproximadamente entre 80% y 85% de la materia suspendida en el agua (SST) y disminuye entre el 50% y 55% la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) (Jiménez, 2001).

El objetivo del tratamiento primario avanzado es reducir los sólidos suspendidos generados principalmente por la materia orgánica particulada presente en el efluente. Dentro de la materia suspendida que es removida se encuentran huevos de helmintos, y algunos metales pesados. Aunque este proceso disminuye la concentración de microorganismos (parásitos, coliformes fecales y protozoarios) es necesaria una etapa posterior de desinfección para lograr disminuir los riesgos de salud al reutilizarla. Es importante mencionar que no tiene efecto significativo sobre los compuestos tóxicos que se encuentran en solución.

Las reacciones que se llevan a cabo en el proceso de coagulación dependen del coagulante que se utilice. De cualquier forma la formación del hidróxido metálico durante este procedimiento causa la producción de una cantidad sustancial de lodo. Al utilizarse sulfato de aluminio como coagulante cuando el agua residual contiene alcalinidad en forma de bicarbonato cálcico o magnésico, la reacción que tiene lugar es la siguiente:



Sulfato de aluminio	Bicarbonato de calcio	Sulfato de calcio	Hidróxido de aluminio	Bióxido de carbono
---------------------	-----------------------	-------------------	-----------------------	--------------------

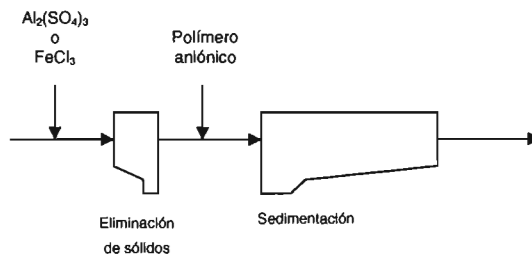
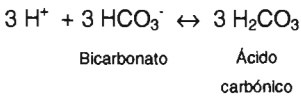
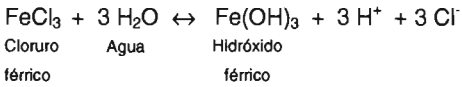


Sulfato de aluminio	Bicarbonato de magnesio	Sulfato de calcio	Hidróxido de aluminio	Bióxido de carbono
---------------------	-------------------------	-------------------	-----------------------	--------------------

El hidróxido de aluminio insoluble es un flóculo gelatinoso que sedimenta lentamente en el agua residual, arrastrando consigo materia suspendida.



Las reacciones en el caso de utilizar cloruro de hierro son las siguientes:



**Figura 3.2. Tratamiento Primario Avanzado (Jiménez, 2001).**

La principal característica de los lodos generados en este tratamiento es su alto contenido de sólidos totales además de que se exceden en más del triple los límites de los parámetros microbiológicos establecidos por la EPA, mientras que por el contrario, la cantidad de metales pesados presentes en los lodos se encuentran debajo de los límites que establece este organismo, lo que permite que puedan ser utilizados como abono después de ser tratados para controlar su contenido microbiológico (Jiménez y Chávez, 1998).

En México existen 16 plantas que cuentan con este tipo de tecnología y cuentan con una capacidad instalada de 11,235 L/s pero se opera al 80% de ésta (8,940 L/s). En el Distrito Federal existe sólo una planta de tratamiento de aguas que opera con TPA y se encuentra localizada en la Delegación Tláhuac. El agua tratada en esta planta y con esta tecnología se utiliza para riego de hortalizas (CNA, 2003).



### 3.1.1 Características técnicas

El proceso de tratamiento fisicoquímico de aguas residuales denominado Tratamiento Primario Avanzado consiste en introducir el agua residual a un reactor de mezclado rápido (proceso de coagulación) y a uno de mezclado lento (proceso de floculación), en donde mediante el uso de agentes químicos son degradados algunos contaminantes presentes en el agua.

Consta de dos etapas, en la primera se realiza un mezclado rápido para dispersar el coagulante y favorecer el contacto con el agua, mientras que en la segunda se realiza una mezcla lenta con la finalidad de promover la formación y el aumento de tamaño y/o densidad de los flóculos (Jiménez, 2001). Estos flóculos pueden ser eliminados por sedimentación, flotación o filtración (Jiménez, 2001).

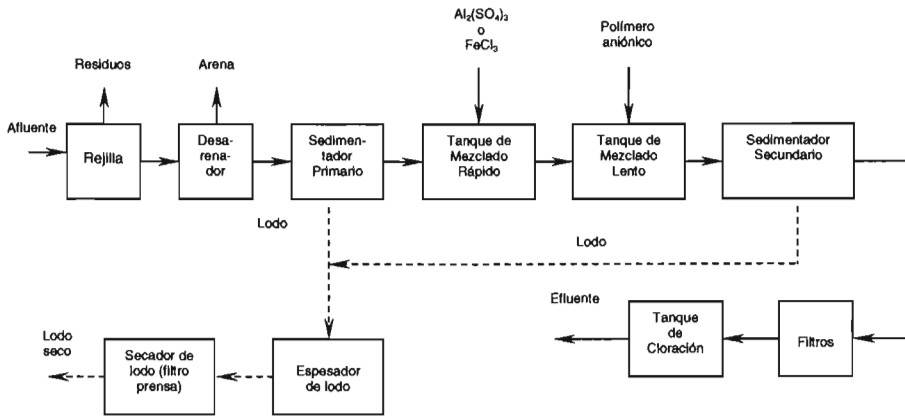
Este tratamiento presenta eficiencias de remoción de sólidos suspendidos totales del orden de 80-85%, de DBO entre 50-55% y de fósforo total del 31% (Jiménez, 2001). El porcentaje de remoción de los nutrientes presentes en el agua residual dependen del coagulante que se utilice. En el caso del sulfato de aluminio, se remueve el 17.42% de nitrógeno y 20.43 % de fósforo. La demanda química de oxígeno disminuye un 28.36% mientras que los huevos de helmintos son reducidos en un 97.7%, obteniendo el nivel requerido para su reúso (Durán *et al.*, 2003). La remoción de coliformes fecales no es suficiente para cumplir con la norma por lo que es importante que después del tratamiento exista una etapa de desinfección.

Para asegurar que el funcionamiento del proceso esté en condiciones óptimas se requiere un ambiente neutro (pH 7). El tiempo total del tratamiento (coagulación-floculación-sedimentación) es de 15 a 45 minutos (Jiménez, 2001). La dosis y relación del coagulante y floculante dependen de la calidad del efluente a tratar y se pueden determinar mediante experimentos de laboratorio (pruebas de jarras) o plantas piloto.



La figura 3.3 ilustra las operaciones unitarias y procesos que forman parte del tratamiento completo de aguas residuales con esta tecnología. Cabe destacar que el tratamiento primario avanzado como tal, sólo está constituido por los tanques de mezclado rápido y lento seguidos del sedimentador.

Para llevar a cabo el proceso completo de tratamiento del agua se propone un sistema de rejillas y/o cribas que elimine sólidos grandes, de un desarenador, un tanque de sedimentación primaria por gravedad, un tanque de mezclado rápido en el cual se lleve a cabo la mezcla de los reactivos y la coagulación, un tanque de mezclado lento en el que se formen los flóculos, un tanque de sedimentación secundaria en donde se eliminen los flóculos por gravedad, un filtro de arena que elimine flóculos finos no sedimentables y un tanque de cloración que desinfecte el agua tratada y clarificada.



**Figura 3.3. Tren de tratamiento de aguas residuales propuesto con el sistema TPA.**



### 3.1.2 Características ambientales

El tratamiento primario avanzado es muy efectivo en cuanto a la eliminación de huevos de helmintos y algunos otros microorganismos presentes en el agua residual. Por esta razón el lodo producido en este tratamiento presenta una alta concentración de patógenos, lo que hace necesario el someterlo a un proceso de acondicionamiento de lodos para su estabilización y posterior disposición final.

**Tabla 3.1. Características del lodo residual generado por el TPA.**

PARÁMETRO	VALOR	LÍMITES PERMISIBLES NOM-004-SEMARNAT-2002 Buenos, clase C
pH	5.92	NR
SRF*	$1.55 \times 10^{13}$ m/kg	NR
Coliformes Totales	$6.0 \times 10^7$ NMP/g ST	NR
Coliformes Fecales	$2.0 \times 10^6$ NMP/g ST	< 2 000 000
<i>Salmonella spp</i>	0 NMP/g ST	< 300
Huevos de Helmintos	38 HH/g ST	< 35
Arsénico	3.64 mg/kg	75 mg/kg
Cadmio	0.175 mg/kg	85 mg/kg
Cromo	1.81 mg/kg	3 000 mg/kg
Cobre	12.5 mg/kg	4300 mg/kg
Plomo	3.43 mg/kg	840 mg/kg

\*SRF: Specific filtration rate (tasa específica de filtración)

La calidad y cantidad de los lodos generados con el tratamiento primario avanzado dependen de la calidad del caudal a tratar y en mayor medida, de la cantidad de reactivos utilizados para el proceso de coagulación floculación.



La producción de estos residuos utilizando una dosis de sulfato de aluminio (coagulante) de 20 mg/L y una dosis de floculante de 0.1 mg/L es de 0.19 gST/L (Durán *et al*, 2003).

Las características del lodo residual del tratamiento primario avanzado se muestran en la tabla 3.1. Comparando la concentración de los contaminantes presentes en el lodo con los límites permisibles que marca la NOM-004-SEMARNAT-2002, se observa que la calidad de éstos corresponden al tipo “bueno” clase C.

### 3.1.3 Aplicaciones

Este tipo de tratamiento se utiliza cuando el agua residual contiene una gran cantidad de compuestos en forma coloidal o suspendidos (tóxicos o no tóxicos), y cuando los componentes del agua residual no son biodegradables (Jiménez, 2001). También es recomendado cuando el agua tratada se pretende utilizar para riego agrícola, cuando ésta será descargada en algún cuerpo de agua en el cual se diluya o cuando los requerimientos del efluente sean menores a 30/30 DBO/SST.

Este método es utilizado eficazmente para la remoción de huevos de helmintos del agua residual doméstica, con el fin de obtener un efluente adecuado para reutilizarlo en riego agrícola. El TPA es capaz de disminuir los huevos de helmintos a concentraciones menores de 1 H-H/L, minimizando la remoción de materia orgánica y nutrientes que representan un beneficio para la agricultura.

Estudios realizados en el Instituto de Ingeniería de la UNAM muestran que la remoción de metales pesados que ofrece este tratamiento para un caudal de agua residual mixto genera un efluente con cantidades de metales pesados que rebasan los límites que marca la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) para agua utilizada en cualquier tipo (Jiménez y Chávez, 1997) así como de los marcados en la NOM-001-SEMARNAT-96 para uso en riego agrícola.



### 3.1.4 Ventajas y desventajas

A continuación se enlistan algunas ventajas y desventajas más importantes del tratamiento primario avanzado.

#### Ventajas

- Remueve eficientemente metales pesados como plomo, zinc y cobre con eficiencias del orden de 70% de afluentes mixtos (Jiménez y Chávez, 1997).
- Mantiene niveles adecuados de DQO, nitrógeno y fósforo que producen efectos benéficos en la agricultura (Jiménez y Chávez, 1997).
- Disminuye huevos de helmintos a  $<1$  H-H / L cumpliendo con las disposiciones de la NOM-001 (Jiménez y Chávez, 1997).
- Disminuye eficientemente los sólidos suspendidos y coloidales presentes en el afluente (Durán *et al.*, 2003).

#### Desventajas

- Reduce sólo el 10% de los coliformes fecales presentes en el agua residual por lo que se requiere de un proceso de desinfección después del tratamiento (de  $1.24 \times 10^9$  a  $1.2 \times 10^8$ ) (Jiménez *et al.*, 2001).
- No presenta efectos significativos en compuestos tóxicos y en microorganismos patógenos que se encuentran en solución (Durán *et al.*, 2003).
- Los lodos generados con este tratamiento contienen una gran cantidad de patógenos (Ramírez Zamora *et al.*, 2002).





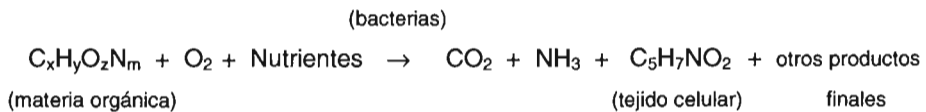
### 3.2 LODOS ACTIVADOS

Este proceso fue desarrollado en Inglaterra en 1914 por Andern y Lockett y fue llamado así por la producción de una masa activada de microorganismos capaz de estabilizar un residuo por vía aerobia (Metcalf y Eddy, 1996). El lodo activado es un conglomerado de microorganismos, materia orgánica y materiales inorgánicos (Jiménez, 2001).

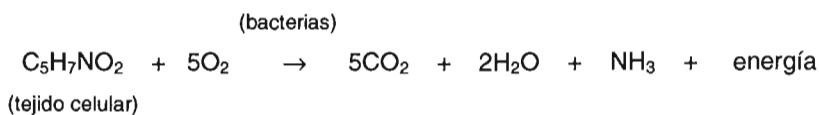
El sistema de lodos activados es un proceso biológico de tratamiento de aguas residuales de biomasa suspendida, fundamentado en la capacidad natural de los microorganismos para degradar la materia orgánica contaminante en diferentes gases y tejido celular. En el caso particular del proceso de lodos activados se trata de un tratamiento aerobio ya que emplea bacterias que requieren una fuente de oxígeno molecular para llevar a cabo sus funciones de catabolismo, anabolismo y autólisis.

El proceso consiste en introducir el agua contaminada con residuos orgánicos a un reactor donde se mantiene un cultivo bacteriano aerobio en suspensión que lleva a cabo la conversión de acuerdo a la estequiometría de las siguientes ecuaciones (Metcalf y Eddy, 1996).

#### 1.- Oxidación y síntesis (*catabolismo y anabolismo*):



#### 2. Respiración endógena (*autólisis*):





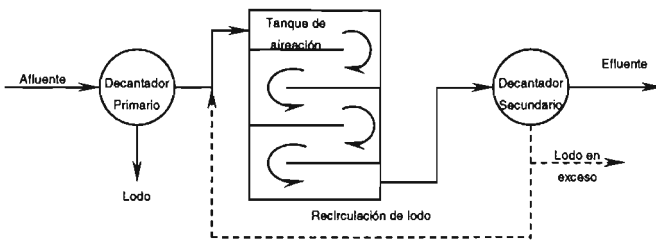
En el proceso de lodos activados un residuo se estabiliza biológicamente en un reactor bajo condiciones aerobias. El ambiente aerobio se logra mediante el uso de aireación por medio de difusores o aireadores (sistemas mecánicos) lográndose una mezcla homogénea. Al contenido del reactor se le llama licor mezclado o líquido mezcla.

Una vez que el agua residual ha sido tratada en el reactor, la masa biológica resultante se separa del líquido en un tanque de sedimentación y parte de los sólidos sedimentados son retornados al reactor para mantener en éste una concentración bacteriana adecuada, mientras que la masa sobrante es eliminada o purgada y enviada a estabilización, puesto que si no fuera así la masa de microorganismos continuaría aumentando hasta que el sistema no pudiera dar cabida a más.

En el proceso de lodos activados, las bacterias son los microorganismos más importantes, ya que éstos son la causa de descomposición de la materia orgánica del efluente. En el reactor parte de la materia orgánica del agua residual es utilizada por las bacterias aerobias con el fin de obtener energía para la síntesis del resto de la materia orgánica en nuevas células. Otro tipo de microorganismos igualmente de importantes son los protozoos y rotíferos que actúan como depuradores de los efluentes. Los protozoos consumen las bacterias dispersas que no han floculado y los rotíferos consumen partículas biológicas que no hayan sedimentado (Metcalf y Eddy, 1996).

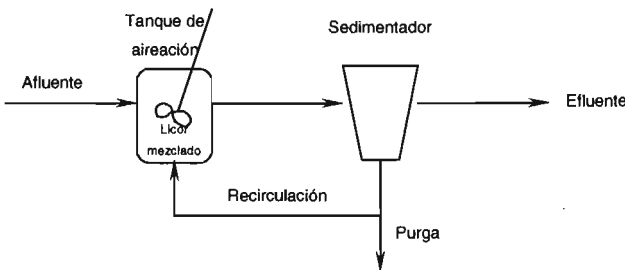
El sistema de lodos activados es el más aplicado mundialmente (Jiménez, 2001). La primera opción empleada fue la forma convencional que opera con un régimen de flujo pistón. En la actualidad se usan muchas versiones del proceso original, pero todas ellas son fundamentalmente iguales. Existen nueve variantes en total de este sistema, entre las más utilizadas son la forma convencional, la completamente mezclada y la aireación extendida (Jiménez, 2001).

Las figuras 3.4 y 3.5 ilustran el sistema de lodos activados utilizando el reactor de flujo en pistón (convencional) y el reactor de mezcla completa (tanque de flujo continuo con agitación) respectivamente.



**Figura 3.4. Proceso de lodos activados convencional (Metcalf y Eddy, 1996).**

El proceso de lodos activados convencional está basado en un modelo de flujo pistón con difusores de aire o agitadores mecánicos. Es utilizado para tratar aguas residuales domésticas de baja concentración. Este proceso es susceptible a choques de carga. Sin embargo el proceso de mezcla completa es utilizado en aplicaciones generales además de ser resistente frente a choques de carga. Una desventaja de este último proceso es que es susceptible al desarrollo de organismos filamentosos (Metcalf y Eddy, 1996).



**Figura 3.5. Proceso de lodos activados mezcla completa (Metcalf y Eddy, 1996).**

El sistema de aireación extendida se lleva cabo en reactores de mezcla completa también se lleva a cabo en un tanque de mezcla pero en este caso el tanque es de un volumen mucho mayor.

México cuenta con 259 plantas de tratamiento con lodos activados y cuenta con una capacidad instalada de 36,238.8 L/s y su capacidad operacional es de 24,393.35 L/s. Dentro del Distrito Federal existen 11 plantas que trabajan con la tecnología de lodos



activados convencional ubicadas en las delegaciones Gustavo A. Madero, Iztacalco, Miguel Hidalgo, Tláhuac, Tlalpan y Xochimilco (CNA, 2003).

### 3.2.1 Características técnicas

El sistema de lodos activados basa su funcionamiento en la actividad de las bacterias presentes en el lodo activado, que son las causantes de la descomposición de la materia orgánica del afluente, convirtiéndola en flóculos biológicos sedimentables y en sólidos orgánicos que puedan eliminarse por sedimentación (Metcalf y Eddy, 1996).

Este sistema está constituido por un tanque de aireación y un sedimentador secundario. En el tanque de aireación un cultivo bacteriano en suspensión estabiliza biológicamente el agua residual por vía aerobia, mientras que el sedimentador remueve la masa bacteriana contenido en el efluente del reactor. Las bacterias aerobias utilizan parte de la materia orgánica del agua residual con el fin de obtener energía para la síntesis del resto de la materia orgánica en forma de células nuevas (Jiménez, 2001).

Parte de los microorganismos removidos en el sedimentador retornan al tanque de aireación (lodo de retorno) y se mezcla con el afluente al tanque formando el "licor mezclado, mientras que el exceso de lodo producido se retira del sistema con el fin de mantener constante la concentración de microorganismos en el tanque de aireación (Eckenfelder *et al.*, 1985). El agua decantada y el lodo activado recirculado que entran en el tanque de aireación, se mezclan con el aire disuelto o con los agitadores mecánicos. Durante el periodo de aireación, se produce la adsorción, floculación y oxidación de la materia orgánica. Los sólidos del lodo activado se separan en el decantador secundario.

Existen factores de gran importancia que afectan la eficiencia de este proceso como lo son la temperatura, el pH y la alcalinidad. La dependencia de la temperatura en la constante de la velocidad de la reacción biológica es muy importante ya que no sólo influye en las actividades metabólicas sino que tiene un profundo efecto en factores



tales como las tasas de transferencia de gases y características de sedimentación de sólidos biológicos. Los valores de pH bajos pueden inhibir el crecimiento de los organismos nitrificantes y favorecer el crecimiento de organismos filamentosos. Las aguas residuales de baja alcalinidad pueden provocar que el pH del líquido mezcla descienda debido a la producción de dióxido de carbono por la respiración bacteriana (Metcalf y Eddy, 1996).

Como ya se mencionó anteriormente existen variantes del proceso de lodos activados convencional cuyas formas de operación son distintas entre si y por lo tanto sus eficiencias y aplicaciones también lo son. Los parámetros de diseño y operativos de los procesos más utilizados de lodos activados se muestran en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2. Parámetros de diseño y operación de algunos procesos de lodos activados.**

Tipos de proceso	$\Theta_c$	F/M	$V_L$	$\Theta$	SSLM	Q <sub>r</sub> /Q	R.F.	$\eta$	Aire abastecido
Convencional	4-15	0.2-0.4	0.3-0.6	4-8	1500-3000	0.25-0.5	FP	85-95	45-90
Completamente mezclado	4-15	0.2-0.4	0.8-2.0	3-5	3000-6000	0.25-1.0	CM	85-95	45-90
Aireación extendida	20-30	0.05-.15	0.16-0.4	18-24	3000-6000	0.75-1.50	CM	75-90	90-125

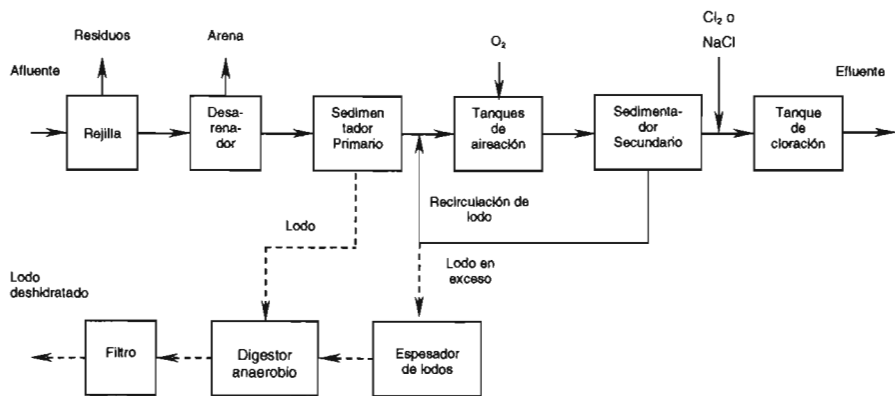
- $\Theta_c$  Tiempo medio de residencia celular (días)
- F/M Relación sustrato-biomasa (kg DBO<sub>5</sub>/Kg SSLV)
- $V_L$  Carga volumétrica (Kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>)
- $\Theta$  Tiempo de retención hidráulica (horas)
- SSLM Sólidos suspendidos en el licor mezclado (mg/L)
- Q<sub>r</sub>/Q Razón de recirculación
- R.F. Régimen de flujo
- $\eta$  Eficiencia de remoción de la DBO<sub>5</sub> (%)
- Aire abastecido en m<sup>3</sup>/kg DBO<sub>5</sub>
- FP Flujo pistón
- CM Completamente mezclado

En general, para obtener eficiencias de 85% a 95%, el tiempo de retención celular (tiempo en el cual permanecen los microorganismos dentro del sistema) es de 4 a 15 días, para cargas de 0.2 a 0.4 kg DBO / kg SST·d o para 0.3 a 0.6 kg DBO/m<sup>3</sup>·d con un tiempo de retención hidráulica (tiempo en el que el caudal del agua permanece dentro del reactor) de 4 a 8 horas (Jiménez, 2001). El proceso de lodos activados llevado a cabo dentro del un tanque de aireación reduce la DBO soluble a menos de 10-15 mg/L,



y la DBO total incluyendo sólidos suspendidos a menos de 30 mg/L (Eckenfelder *et al.*, 1985).

El equipo que se propone en el presente estudio, para el tratamiento completo del agua residual consiste en: rejilla, desarenador, clarificador primario, tanque de aireación, clarificador secundario y tanque de cloración.



**Figura 3.6. Diagrama de flujo del proceso de lodos activados con tratamiento de lodos (Adaptado de Mecalf y Eddy, 1996).**

Los sólidos grandes presentes en el afluente se remueven por medio de las rejillas y la arena es removida con el desarenador. El clarificador primario remueve todos los sólidos suspendidos posibles del efluente que, una vez clarificado, es mezclado con el lodo activado que se recircula del reactor (licor mezclado), y entra al reactor de aireación en donde se lleva a cabo la bio-oxidación de la mayoría de la materia orgánica presente en el efluente, y el clarificador secundario remueve los sólidos biológicos que después son mezclados con los producidos en el clarificador primario.

El efluente del sedimentador secundario es desinfectado en el tanque de cloración para destruir a los organismos patógenos presentes y de esta forma poder ser descargado al cuerpo de agua receptor o ser reutilizado.



### 3.2.2 Características ambientales

La función básica del proceso de tratamiento biológico es convertir los compuestos orgánicos en bióxido de carbono y nuevas bacterias. Parte de estas células bacterianas se convierten en lodo en exceso.

En general, el tratamiento de lodos activados produce una gran cantidad de sólidos, por cada kg de DBO removida del afluente se generan 0.5 kg de lodo en exceso seco (Liu, 2003). Estos residuos contienen concentraciones altas de material orgánico como aminoácidos proteínas, carbohidratos. Por esta razón constituyen una fuente abundante de alimento para los microorganismos ya que degradan estas fuentes de energía y se forman compuestos olorosos (EPA, 2002).

Castillo *et al.* 2002, estudiaron las características de los lodos generados por este tratamiento y determinaron que la cantidad de coliformes que se encuentran en este tipo de biosólidos es de  $2.3 \times 10^9$  NMP/g con un 85% de humedad, 35% de carbono y 0.8 % de nitrógeno.

### 3.2.3 Aplicaciones

El proceso de lodos activados es el más utilizado para reducir la concentración de contaminantes orgánicos disueltos, particulados y coloidales. Recientemente ha sido utilizado como un proceso de nitrificación para reducir la concentración de amoníaco (Long, 1991). Dependiendo del proceso de lodos activados es la aplicación que tienen. El proceso convencional es efectivo para tratar aguas residuales domésticas con baja concentración de materia orgánica debido a que el agua residual no se dispersa de manera uniforme en todo el reactor impidiendo que los sólidos biológicos soporten un alto contenido de materia orgánica.



Sin embargo, el proceso completamente mezclado tiene una aplicación general ya que es resistente a variaciones de carga contaminante.

### 3.2.4 Ventajas y desventajas

Algunas de las principales ventajas y desventajas del sistema de lodos activados se mencionan a continuación.

#### Ventajas

- Presenta una eficiencia de eliminación de DBO de entre 85 y 95%.
- Genera efluentes con DBO carbonosa entre 2 y 10 mg/L, materia orgánica suspendida entre 5 y 15 mg/L y sólidos no biodegradables entre 5 y 5 mg/L.

#### Desventajas

- Su eficiencia disminuye al tratar caudales con alta concentración de materia orgánica y compuestos tóxicos (Metcalf y Eddy, 1996).
- Genera una cantidad importante de lodos biológicos de desecho.
- Es un proceso susceptible a variaciones de carga (Jiménez, 2001).





## CAPÍTULO 4. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS

El creciente problema de la contaminación del agua alrededor del mundo a desembocado en el estudio de las tecnologías tradicionales de tratamiento de aguas residuales con el fin de eficientarlas, así como en el desarrollo de nuevas alternativas de tratamiento. Los tratamientos avanzados son el resultado de este desarrollo tecnológico y representan varias ventajas sobre los tratamientos tradicionales.

El proceso de tratamiento de aguas residuales necesita de varias operaciones de tratamiento para reducir la concentración de los contaminantes presentes en el agua residual hasta el nivel requerido según su disposición final. Los procesos tradicionales requieren varias unidades de tratamiento para cumplir con este objetivo lo cual resulta poco práctico.

Bajo la tendencia de mejorar la calidad del agua tratada y reducir las instalaciones de las plantas de tratamiento de aguas, se han desarrollado nuevas y mejores alternativas como son los sistemas que operan procesos fisicoquímicos avanzados (adsorción, intercambio iónico, oxidación química, electroquímica y fotoquímica y los procesos de membrana). El proceso de oxidación avanzada con el reactivo de Fenton (método de Fenton) y los bio-reactores de membrana forman parte de estos novedosos sistemas.

### 4.1 MÉTODO DE FENTON

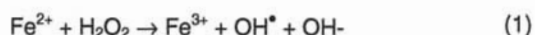
El método de Fenton es un proceso de oxidación avanzada en donde la reacción catalítica entre los agentes  $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$  (reactivo de Fenton) genera radicales  $\text{OH}^*$  que actúan como agente oxidante.

Fue descubierto en 1894 por H.J.H. Fenton, pero su aplicación en el tratamiento de aguas contaminadas con compuestos orgánicos tóxicos o no biodegradables fue practicada hasta los años sesenta.



### *Mecanismo de la reacción térmica de Fenton*

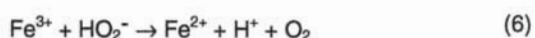
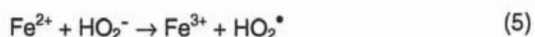
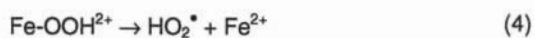
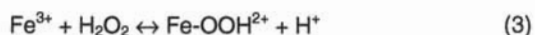
Para la reacción térmica de Fenton hay mecanismos químicos que proponen a los radicales hidroxilos como la especie oxidante, que son generados en la siguiente ecuación química:



Los radicales hidroxilo reaccionan con otro  $\text{Fe}^{2+}$ :

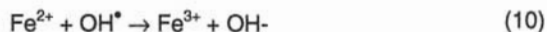
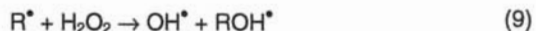
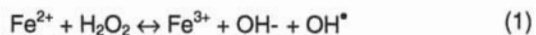


El ión  $\text{Fe}^{3+}$  descompone catalíticamente al  $\text{H}_2\text{O}_2$ , siguiendo un mecanismo que incluye a los radicales hidroxilo y perhidroxilo:

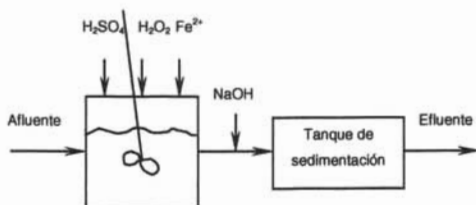


Durante el proceso de oxidación de Fenton, el radical hidroxilo  $\text{OH}^\bullet$  ataca a los compuestos orgánicos (RH) en el agua residual y ocasiona su descomposición formando una gran cantidad de flóculos que se forman en el agua residual.

Esos flóculos son complejos hidroxilo-férricos formados por complejas reacciones en cadena entre el peróxido y los iones ferrosos. Esta serie de reacciones también producen compuestos intermediarios que son generalmente ácidos carboxílicos (Millán, 2005). La velocidad de reacción del reactivo de Fenton es generalmente limitada por la generación de radicales hidroxilo.



El método de Fenton involucra a los procesos de coagulación-floculación y oxidación avanzada en una sola etapa lo cual representa muchas ventajas en la calidad del agua tratada con respecto a los tradicionales tratamientos biológicos, además de que puede ser aplicado in-situ (Lin, 1999). Generalmente el proceso de oxidación con el reactivo de Fenton consta de cinco etapas, que son las siguientes: Ajuste de pH ácido (3-3.5), reacción de oxidación, coagulación-floculación, neutralización, precipitación.



**Figura 4.1** *Proceso Fenton (Reactor Batch).*

La velocidad de reacción con el reactivo de Fenton se incrementa con la temperatura, con el efecto más pronunciado a temperaturas mayores de 20°C. Sin embargo, cuando la temperatura aumenta por arriba de 40 ó 50°C, la eficiencia de la utilización del peróxido decrece. Lo anterior se debe a que se acelera la descomposición de peróxido de hidrógeno en oxígeno y agua (González, 2001).

El tiempo necesario para completar la reacción de Fenton depende de muchas variables, de entre las cuales sobresale la dosis del catalizador de hierro y el agua a tratar.



Por ejemplo, para la oxidación eficiente de contaminantes presentes en caudales municipales parecidos en composición a los colectados en la PTAR de Ciudad Universitaria, el tiempo típico de reacción es de 60 minutos (Martínez y Vite, 2004). Para aguas concentradas y complejas la reacción puede tomar varias horas (Millán, 2005).

El proceso se ha aplicado al tratamiento de agua residual, tratamiento de lodos o suelos contaminados con los siguientes efectos (Millán, 2005):

- Remoción de contaminantes orgánicos
- Reducción de la toxicidad
- Mejora de la biodegradabilidad
- Remoción de DQO / DBO
- Remoción de olor y color

Una de las tecnologías más efectivas para remover compuestos orgánicos de soluciones acuosas comprobadas es el tratamiento con el reactivo de Fenton. De hecho, este método ha sido empleado exitosamente en el tratamiento de distintas aguas residuales industriales en muchas investigaciones previas, considerando al peróxido de hidrógeno como un "reactivo limpio" ya que lo que no se consume en la oxidación del contaminante se descompone rápidamente para formar solamente  $O_2$  y  $H_2O$  como productos del tratamiento.

### 4.1.1 Características técnicas

Los procesos de oxidación avanzada (AOP por sus siglas en inglés *Advanced Oxidation Processes*), se distinguen por la capacidad de explotación de la alta reactividad de los radicales hidroxilo ( $OH^\bullet$ ) en el proceso de oxidación controlado.



Durante el proceso de oxidación avanzada con el reactivo de Fenton, el radical hidroxilo  $\text{OH}^{\bullet}$  ataca a los compuestos orgánicos (RH) presentes en el agua lo cual ocasiona su descomposición formando una gran cantidad de flocúlos (complejos hidroxio-férricos).

Este tratamiento consiste en llevar a cabo el proceso de coagulación-floculación junto con oxidación avanzada, para lo cual se introduce el agua residual a un reactor de mezclado rápido (proceso de coagulación) y posteriormente a uno de mezclado lento (proceso de floculación), en donde mediante el reactivo de Fenton la mayoría de los contaminantes son degradados. Es necesario remover los flocúlos formados durante este proceso por medio de sedimentación de manera que el efluente del tratamiento sea clarificado.

La eficiencia del reactivo de Fenton utilizado en el tratamiento de aguas residuales depende de la calidad del afluente así como de la relación y dosis de reactivos utilizados. Estudios en los cuales se variaron las relaciones y dosis de los reactivos, realizados por Durán *et al.* (2003), indican que la remoción de DQO es mayor del 50% mientras que la remoción de color, turbiedad y sólidos suspendidos es mayor al 85%. Utilizando una relación molar de 1:1 de los reactivos y una dosis de 24 mg/L, la eficiencia de remoción de DQO es del 57% y de sólidos suspendidos totales es de 89%.

Al igual que los otros tratamientos estudiados en este trabajo, el tratamiento del agua residual con esta tecnología requiere del pretratamiento de ésta mediante rejillas o cribas que separen las basuras, un desarenador, un sedimentador primario. A diferencia de los demás procesos, esta tecnología requiere de un tanque de acondicionamiento ya que es necesario que el caudal a tratar tenga un ambiente ácido con un pH entre 3 y 3.5 para asegurar la formación de iones ferrosos y de esta forma el tratamiento sea eficiente.

Se requiere también del tanque de mezclado rápido (100 rpm), del tanque de mezclado lento (30 rpm), un sedimentador secundario y un filtro cuyas funciones son las mismas que en el TPA.



La figura 4.2 muestra una propuesta del diagrama de flujo del tratamiento completo de aguas residuales utilizando el sistema de oxidación avanzada con el reactivo de Fenton.

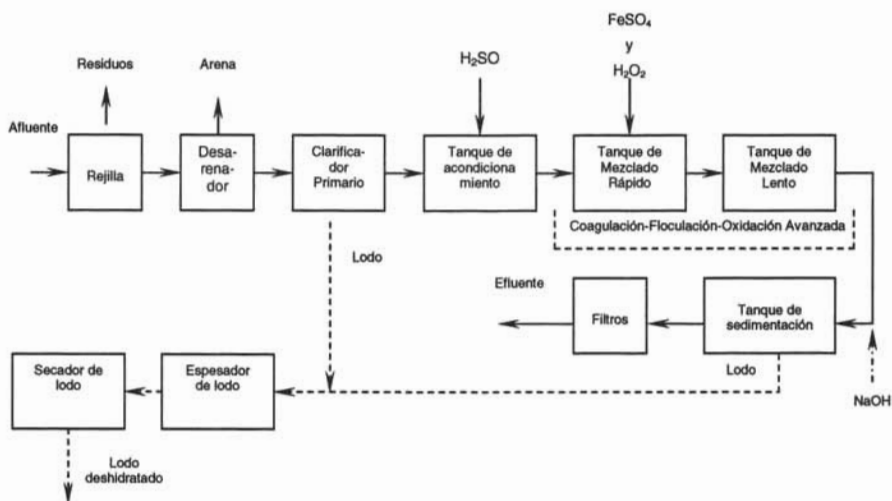


Figura 4.2 Tren de tratamiento de aguas residuales con el método de Fenton.

#### 4.1.2 Características ambientales

El reactivo de Fenton está considerado como un reactivo limpio, ya que la cantidad de los lodos que se generan en el tratamiento secundario de aguas residuales utilizando este reactivo es mucho menor que la que generan los procesos biológicos y fisicoquímicos convencionales, en especial los lodos activados y el TPA. Así mismo, la calidad de los lodos residuales de este proceso es alta, ya que no contienen organismos patógenos (están desinfectados).

Ramírez-Zamora *et al.* en el año 2001, analizaron las características de los lodos generados durante el proceso de Fenton y encontraron que la resistencia específica a la filtración (SRF) que presentan estos lodos es de  $1.55 \times 10^{13}$  m/kg lo que permite disminuir los costos de transporte y deposición de los lodos, la concentración de coliformes fecales fue 0 NMP/g TS y de huevos de Helminto de 22H-H/g TS.



En cuanto a la presencia de metales pesados, ésta corresponde a los límites de biosólidos clase B de acuerdo con la legislación mexicana.

En el Instituto de Ingeniería y en la Facultad de Química de la UNAM se ha estudiado la producción de lodos con el reactivo de Fenton, así como sus características, algunas de las cuales se encuentran en la tabla 4.1. Se ha demostrado también que la cantidad de lodos generados depende directamente de la dosis de reactivos utilizada. Trabajando con una relación 1:1 ( $Fe^{2+}/H_2O_2$ ) y con una dosis de 24 mg/L se generan 0.17 gST/L (Durán *et al*, 2003).

Tabla 4.1. Características de los lodos generados con el método de Fenton (Durán *et al.*, 2003).

PARÁMETRO	VALOR	LÍMITES PERMISIBLES NOM-004-SEMARNAT-2002 Buenos, clase B
pH	3.98	NR
SRF	$1.92 \times 10^{13}$ m/kg	NR
Coliformes Totales	0 NMP/g ST	NR
Coliformes Fecales	0 NMP/g ST	< 1 000
<i>Salmonella spp</i>	0 NMP/g ST	< 3
Huevos de Helmintos	22 HH/g ST	< 10
Arsénico	2.46 mg/kg	75 mg/kg
Cadmio	0.13 mg/kg	85 mg/kg
Cromo	1.21 mg/kg	3 000 mg/kg
Cobre	11.41 mg/kg	4300 mg/kg
Plomo	3.57 mg/kg	840 mg/kg

De acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002, los lodos residuales producidos con el método de Fenton son desechos sólidos clase B ya que la concentración de patógenos y parásitos está dentro de los límites permitidos, y son tipo “bueno” de acuerdo con la cantidad de metales pesados que éstos contienen.



### 4.1.3 Aplicaciones

La primera aplicación del reactivo de Fenton fue la remoción de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales municipales (Bishop *et al.*, 1968), pero en estudios recientes se ha demostrado que debido a la oxidación letal de los microorganismos presentes en el agua residual este tratamiento ofrece además un efecto desinfectante.

Esta tecnología es apropiada para efluentes que contengan materia recalcitrante (a la degradación química), tóxica y no biodegradable. El proceso de oxidación avanzada con el reactivo de Fenton es utilizado para disminuir los niveles de materia orgánica en términos de carbono orgánico disuelto (COD) y de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), y para remover tanto compuestos orgánicos como inorgánicos oxidables. El proceso puede oxidar completamente materiales orgánicos hacia dióxido de carbono y agua, aunque esto no suele ser necesario para operar el proceso a esos niveles de tratamiento (Millán, 2005).

### 4.1.4 Ventajas y desventajas

Las principales ventajas y desventajas de esta tecnología son las siguientes:

#### Ventajas

- Debido al proceso de oxidación que se lleva a cabo en este tratamiento, el consumo de cloro es mínimo (sólo para garantizar un efecto residual), ya que el efluente generado ya está desinfectado.
- Es una técnica muy eficiente para la remoción de compuestos tóxicos así como de microorganismos patógenos (Ramírez Zamora *et al.*, 2002) al ser oxidados o transformados en moléculas más pequeñas y fácilmente eliminables en la etapa de filtración.
- La cantidad de lodos generados es 10% menor que la que generan los sistemas de coagulación-floculación (Durán *et al.*, 2003).





- La calidad de los lodos generada está dentro de los límites que marca la NOM-004-SEMARNAT-2002 para ser aprovechados en el mejoramiento de suelos (abono) sin de algún tratamiento biológico o químico para este fin.
- Es un sistema flexible ya que puede tratar eficientemente caudales tanto municipales como industriales ajustando la dosis de reactivos.

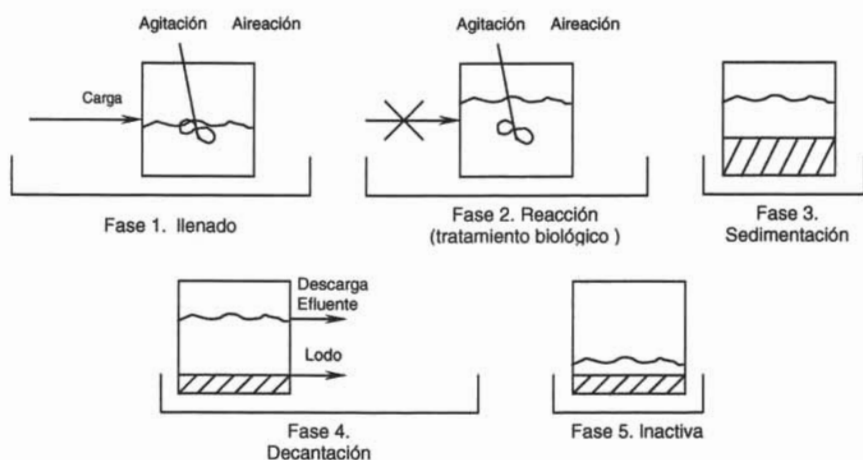
### Desventajas

- Los reactivos necesarios para este tratamiento son más caros que los agentes coagulantes y floculantes comunes (Durán *et al.*, 2003).
- Se requiere un tanque de acondicionamiento antes del tratamiento (pH = 3.5) y después del mismo (para neutralizar) lo cual incrementa los costos de inversión y mantenimiento.
- Se requieren bombas para la adición de los reactivos y compuestos químicos que requiere el tratamiento lo que implica un incremento en el consumo energético.

## 4.2 SISTEMAS SBR (REACTORES DISCONTINUOS SECUENCIALES)

Los reactores discontinuos secuenciales o sistemas SBR (por sus siglas en inglés, *Sequencing Batch Reactors*) pertenecen a la tecnología de lodos activados ya que se retiene una alta densidad de células en su interior, la única diferencia es que todo el tratamiento se lleva a cabo dentro del reactor. Los SBR son reactores de llenado/vaciado.

Algunos autores mencionan que estos sistemas constan de tres fases de operación (EPA, 1999): Llenado-aireación, sedimentación y decantación. Otros mencionan cinco fases (Metcalf y Eddy, 1996): Llenado, reacción, sedimentación, extracción y fase inactiva. De cualquier forma, la operación general de este sistema es la misma. Un esquema de operación de los reactores discontinuos secuenciales se ilustra en la figura 4.3.



**Figura 4.3** Operación de los reactores discontinuos secuenciales. (adaptado de *Envicare, 2002*).

Esta tecnología consta de uno o varios reactores de lodos activados en paralelo que operan en una secuencia de tiempo determinada. En este proceso el agua residual entra al reactor durante un tiempo dado (hasta llenarse), con mezclado y aireación. Una vez lleno, el reactor se opera sin admitir flujo (operación batch) durante el tiempo necesario para realizar las reacciones bioquímicas deseadas, recibiendo agitación y aireación.

Terminado el proceso biológico, el contenido se deja sedimentar con el reactor completamente quieto (no hay agitación ni aireación) durante el tiempo necesario para la clarificación del sobrenadante.

El líquido clarificado se descarga hasta un cierto nivel del reactor dejando en su interior el material sedimentado. Durante los últimos momentos de descarga del efluente tratado, se descarga la cantidad de lodos que se generaron durante el último ciclo, a fin de retener la actividad microbiológica necesaria y garantizar que el efluente tratado será clarificado en sucesivas sedimentaciones.



**Figura 4.4** Sistema SBR con dos tanques de aireación en paralelo.

En 1990 existían alrededor de 150 plantas de SBR en Estados Unidos pero su uso está aumentando significativamente en aplicaciones municipales e industriales.

#### 4.2.1 Características técnicas

La tecnología SBR es un sistema de lodos activados para tratamiento del agua residual que utiliza ciclos de llenado y descarga. En este sistema el agua residual entra en una tanda a un reactor único en donde recibe tratamiento para remover componentes indeseables y luego se descarga. La homogenización de caudales (biomasa-agua residual), la aireación y la sedimentación se logran en ese reactor único. Para optimizar el desempeño del sistema, se utilizan dos o más reactores en una secuencia de operación predeterminada (EPA, 1999).

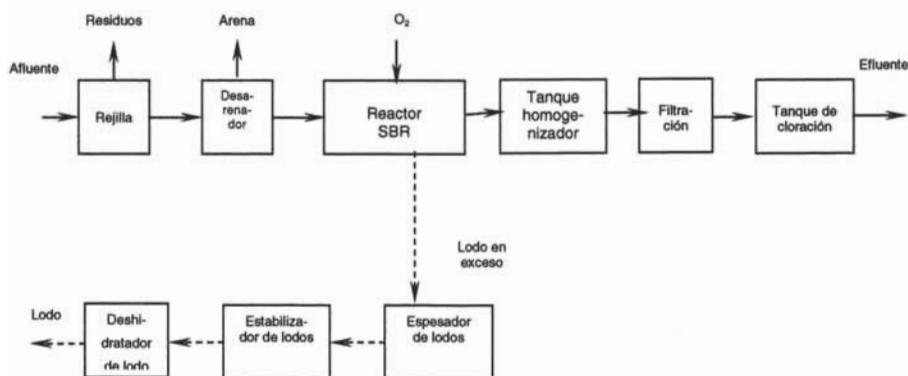
Generalmente las plantas de SBR son diseñadas con 2 ó 4 reactores de lodos activados en paralelo (Envicare, 2003) y cada reactor SBR realiza cinco fases secuenciales de tratamiento: Inactividad, llenado, reacción, sedimentación y descarga (EPA, 1999).

Durante la fase de llenado el afluente entra al reactor y se suministra aire con el fin de mezclar los lodos activados con el agua residual y fomentar el crecimiento de las bacterias (25% del tiempo total del tratamiento). La fase de reacción ocupa el 35% de la duración total del ciclo, la aireación se detiene una vez que se hayan completado las reacciones biológicas. En la fase de sedimentación la biomasa se separa del agua por gravedad y se retira el sobrenadante clarificado (20 % del tiempo).



El exceso de lodo se purga en cualquier punto del ciclo. Después de la fase de sedimentación, el agua residual clarificada es decantada (descarga, 15% del tiempo). Finalmente entra la fase inactiva cuya duración aproximada es del 5% del tiempo total del tratamiento. (Metcalf y Eddy, 1996)

Cuando se trata de afluentes continuos, en el momento en el que el primer reactor SBR comienza el ciclo de sedimentación, el flujo que entra a este reactor se interrumpe y se manda al siguiente SBR dentro de el cual empieza el ciclo de llenado. Los dos o cuatro reactores SBR se alternan en determinado tiempo. El diagrama de flujo del tratamiento completo de aguas residuales municipal que utiliza reactores SBR se muestra en la figura 4.5.



**Figura 4.5** Tren de tratamiento de aguas residuales con el sistema SBR.

La efectividad de este sistema se compara con el sistema de lodos activados convencionales. La eficiencia de remoción de DBO es generalmente de 85-95%. Los fabricantes de los sistemas SBR garantizan efluentes con un máximo de 10 mg/L de DBO y SST, 5-8 mg/L de nitrógeno total y de 1-2 mg/L de fósforo total. (EPA, 1999).

La demanda de energía de muchas plantas de tratamiento de aguas residuales con la tecnología SBR es menor que la mayoría de las plantas convencionales de tamaño comparables (Steinmetz *et al*, 2002).



En el caso del tratamiento de afluentes municipales con esta tecnología, generalmente el pretratamiento que se requiere consiste sólo en un sistema de rejillas y de un desarenador mientras que el postratamiento consiste en filtración y cloración (EPA, 1999).

### 4.2.2 Características ambientales

Las características de los lodos generados con este sistema de tratamiento son las mismas que las de los lodos que se producen con lodos activados ya que éste es el tratamiento en sí. Este tipo de lodos presenta una gran cantidad de microorganismos y materiales inertes. La mayoría de los sólidos son orgánicos lo cual se debe a la naturaleza del tratamiento.

Este tipo de lodos además de ser espesados para quitarles la humedad es necesario un tratamiento adicional que evite que los sólidos adopten condiciones anaerobias y sean pestilentes. El acondicionamiento de este tipo de lodos se basa generalmente en tratamientos biológicos para los cuales se utilizan digestores aerobios o anaerobios, aunque esto depende de cuál sea su disposición final.

### 4.2.3 Aplicaciones

Este tratamiento es una opción altamente eficaz para el tratamiento de afluentes tanto industriales como domésticos o mixtos. Es controlado automáticamente y con estrategias de operación apropiadas, puede minimizarse el consumo energético. Estos sistemas son especialmente efectivos para aplicaciones de tratamiento de agua residual caracterizadas por caudales reducidos o intermitentes (EPA, 1999).



#### 4.2.4 Ventajas y desventajas

Según estudios realizados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (EPA, 1999), las ventajas y desventajas de este proceso son las que se mencionan a continuación.

##### Ventajas

- La homogenización de caudales, el tratamiento biológico y la sedimentación secundaria pueden llevarse a cabo en un reactor único.
- Los SBR sirven como tanque de homogenización de caudales durante su llenado con agua residual, lo cual permite que el sistema tolere caudales o cargas pesadas de contaminantes en el afluente y los homogenice dentro del reactor evitando la dilución de la biomasa (caudales elevados) o la alteración del sistema de tratamiento (cargas altas).
- No se requiere del sedimentador primario si el afluente contiene una DBO o SST menor a 400-500 mg/L.
- No se requieren bombas para recirculación de lodo debido a que sólo hay un tipo de lodo (el residual o en exceso).
- No requiere sedimentadores ni otros equipos lo cual implica un ahorro en la inversión del capital.
- La purga de lodos frecuente hace que de un ciclo a otro exista una relación de masas casi constante entre el sustrato (agua residual) y la biomasa.
- Estas características permiten flexibilidad de operación y control del proceso.

##### Desventajas

- Se requiere un nivel más alto de mantenimiento (comparado con los sistemas convencionales) asociado con el tipo más sofisticado de controles, interruptores automáticos y válvulas automáticas.



- Producción alta de lodos biológicos residuales que requieren de tratamiento antes de su disposición final.
- La eficiencia de remoción de DBO generalmente es del 85 al 95 por ciento.

### 4.3 SISTEMAS MBR (BIO-REACTORES DE MEMBRANA)

Es un sistema integrado por el proceso de degradación biológica (lodos activados) de los contaminantes presentes en el agua residual y el proceso de filtración con el uso de membranas (Cicek, 2003). Este conjunto de procesos generan la remoción altamente efectiva de contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos, así como de organismos biológicos presentes en el agua residual.

Los sistemas de bio-reactores de membrana son una combinación de la tecnología de membrana y los reactores biológicos para el tratamiento de aguas residuales.



**Figura 4.6** Tipos de bio-reactores de membrana, a) MBR externo y b) MBR interno.

Existen dos tipos de bio-reactores de membrana, en los que la membrana se encuentra dentro del reactor (MBR integrado) o en los que la membrana se encuentra fuera del reactor (MBR externo). Se han utilizado diferentes estructuras de membranas en estos sistemas. Entre las que se incluyen las membranas de micro y ultrafiltración tubulares, discos rotatorios, orgánicas, metálicas e inorgánicas (cerámica). El intervalo del tamaño del poro de la membrana utilizado es de 0.01 a 0.4  $\mu\text{m}$  (Cicek, 2003).

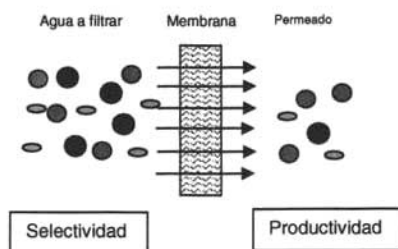
Durante mucho tiempo, el uso de membranas dentro del tren de tratamiento de aguas constaba solamente en un tratamiento terciario para mejorar la calidad del efluente del tratamiento secundario, mientras los procesos de ultrafiltración y microfiltración sólo se utilizaban cuando se requería una alta calidad del efluente o cuando se deseaba el



reúso directo del mismo (Tchobanoglous *et al*, 2003). Con el tiempo y debido a la necesidad de generar efluentes de mejor calidad los módulos de membrana no sólo están siendo utilizados como tratamiento terciario sino que han empezado a formar parte integral del tratamiento secundario (MBR).

La tecnología de membrana se ha convertido en una parte importante de la tecnología de la separación en los últimos decenios. La fuerza principal de la tecnología de membrana es el hecho de que trabaja sin la adición de productos químicos, con un uso relativamente bajo de la energía y conducciones de proceso fáciles y bien dispuestas (Lenntech, 2004). Hay varios métodos para permitir que las sustancias atraviesen una membrana. Ejemplos de estos métodos son la aplicación de alta presión, el mantenimiento de un gradiente de concentración en ambos lados de la membrana y la introducción de un potencial eléctrico (Rosenberger, 2001).

Hay dos factores que determinan la efectividad de un proceso de filtración de membrana: selectividad y productividad. La selectividad se expresa mediante un parámetro llamado factor de retención o de separación (expresado en  $L/m^2 h$ ). La productividad se expresa mediante un parámetro llamado flux (expresado en  $L/m^2 h$ ). La selectividad y la productividad dependen de la membrana.



**Figura 4.7 Filtración de membrana.**

La filtración de membrana se puede dividir en micro y ultrafiltración cuando la filtración de membrana se utiliza para retirar partículas más grandes; y en nanofiltración y ósmosis inversa (RO o hiperfiltración) cuando se necesita desalinizar el agua (Lenntech, 2004).





### Microfiltración

Elimina los sólidos en suspensión de tamaño superior a  $0.1 - 10 \mu\text{m}$ . Es efectiva eliminando los patógenos de gran tamaño como *Giardia* y *Cryptosporidium*. Estas membranas de microfiltración retienen todas las bacterias. Parte de la contaminación viral es atrapada en el proceso, a pesar de que los virus son más pequeños que los poros de la membrana de microfiltración, esto se debe a que los virus se pueden acoplar a las bacterias (Lenntech, 2004).

### Ultrafiltración

Para la eliminación completa de los virus se requiere la ultrafiltración. Los poros de las membranas de ultrafiltración pueden retirar de los fluidos partículas de  $0.001 - 0.1 \mu\text{m}$ . (Lenntech, 2004). Puede emplearse para eliminar esencialmente todas las partículas coloidales y alguno de los contaminantes disueltos más grandes ( $0.01 \mu\text{m}$ ). Puesto que los coloides se eliminan, el agua tratada debe tener una turbidez prácticamente nula.

#### 4.3.1 Características técnicas

Los MBR están compuestos por dos partes principales, la unidad biológica encargada de la biodegradación de los contaminantes del agua residual y del módulo de membrana encargado de la separación física entre el agua tratada y el licor mezclado (Brindle y Stephenson, 1996).

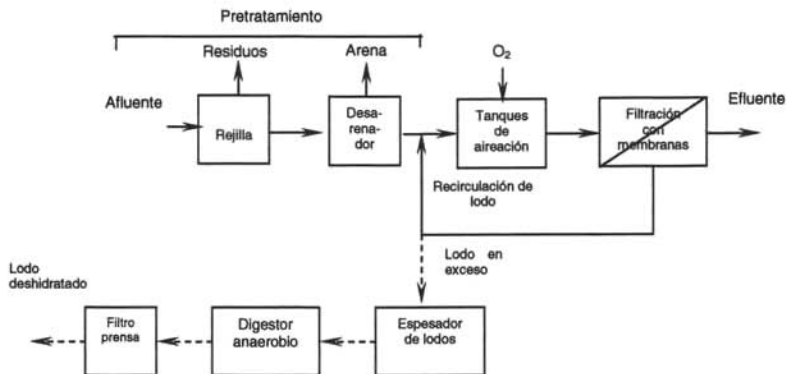
Este sistema es la combinación del tratamiento biológico y la separación altamente eficiente líquido/sólido. El caudal del agua residual después de ser sometido a un pretratamiento, entra al tanque de aireación y las partículas, bacterias e incluso virus son removidos por las membranas de microfiltración (MF) o ultrafiltración (UF).

Existen dos versiones del tratamiento de aguas residuales con sistemas MBR. La primera de ellas se basa en situar una membrana en el interior de un sistema de

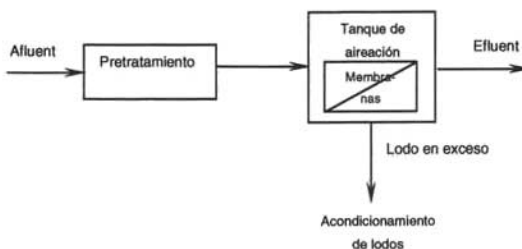


aireación (lodos activados), mientras que en el segundo tipo, la membrana se encuentra fuera de el tanque (Cicek N, 2003).

El principio de este sistema es la acción de la membrana ya que, como un filtro muy específico, deja pasar el agua mientras que retiene toda la materia suspendida y la mayoría de los compuestos solubles. La membrana funciona como una pared de separación selectiva en donde ciertas sustancias pueden atravesar la membrana, mientras que otras quedan atrapadas en ella. En este proceso la sedimentación de los lodos se lleva acabo dentro del reactor de ahí mismo se realiza la purga de los lodos en exceso.



**Figura 4.8** Tren de tratamiento de aguas residuales con el sistema MBR externo.



**Figura 4.9** Tren de tratamiento de aguas residuales con el sistema MBR interno.



El volumen de carga por día recomendada para un sistema MBR aerobio está alrededor de 0.2 kg DQO /m<sup>3</sup>, valor que es similar al de los procesos de lodos activados convencional (Brindle y Stephenson, 1996). El tiempo de retención hidráulica para el tratamiento de agua residual doméstica es alrededor de 1.8 h. La remoción de la materia orgánica es generalmente mayor del 90% del DQO del afluente, la eficiencia más baja que ha sido reportada es de 61% remoción de DQO (Brindle y Stephenson, 1996).

Los bio-reactores de membrana requieren energía para apoyar la actividad biológica (aireación / suministro de oxígeno) así como para mantener el funcionamiento de la membrana (permeabilidad de la membrana). En el caso de sistemas MBR externos se requiere una gran cantidad de energía para recirculación ya que esto mantiene una alta velocidad de flujo cruzado. El consumo de energía depende básicamente del área de la membrana, de la velocidad de flujo cruzado requerida en el módulo de membrana y del requerimiento de oxígeno de los microorganismos (Brindle y Stephenson, 1996).

El consumo energético de los sistemas MBR utilizados en Japón con el fin de producir efluentes para reúso, utilizan aproximadamente entre 3 y 5.5 kWh por metro cúbico de permeado. Esto es 10 veces mayor que el requerido en un sistema de lodos activados convencional (Brindle y Stephenson, 1996).

### 4.3.2 Características Ambientales

En los sistemas de bio-reactores de membrana, la separación y retención de la biomasa se lleva a cabo a través del módulo de membrana, de manera que el tiempo de retención hidráulica y celular son independientes, así el tiempo de retención celular puede alargarse tanto como se desee.

La producción de lodos en los sistemas MBR es reducido entre el 28 y 68% comparado con los sistemas de lodos activados convencionales. Si se mantiene una relación sustrato/biomasa (F/M) baja dentro del reactor se tiene como resultado una producción



mínima de lodo residual, así como la reducción el tamaño de la planta. Con el sistema MBR integrado, en el cual el módulo de membrana se encuentra dentro del reactor, en el tratamiento de aguas residuales domésticas con una gran cantidad de materia orgánica, la cantidad de lodo producido es muy baja (Brindle y Stephenson, 1996).

Este sistema produce lodos residuales que además de contener biomasa (bacterias) y material inerte, contiene también una gran cantidad de patógenos virus que son retenidos con este sistema de filtración. Por esta razón estos residuos sólidos deben acondicionarse antes de su disposición final. El hecho de retener dentro del reactor todos los sólidos suspendidos del afluente así como materia orgánica soluble hace que éstos no se filtren y sedimenten de forma óptima (Cicek, 2003).

### 4.3.3 Aplicaciones

Brindle y Stephenson (1996) refieren que Smith *et al.* reportaron por primera vez en 1969 el uso de la combinación de membranas con un tratamiento biológico de aguas residuales en el cual una membrana de ultrafiltración fue utilizada para la separación de el lodo activado de efluente final y retornado al tanque de aireación. Esta tecnología se ha utilizado con procesos aerobios y anaerobios (Brindle y Stephenson, 1996).

Inicialmente el sistema MBR fue utilizado para el tratamiento de aguas residuales municipales teniendo gran éxito en la producción de agua con la calidad necesaria para su reutilización. A mediados de los 90's el desarrollo de membranas sumergibles hizo posible que sistema MBR tuviera aplicaciones a gran escala de caudales de agua residual municipal.

Actualmente más de 1,000 sistemas MBR están en operación en todo el mundo, aproximadamente el 66% se encuentran en Japón y el resto en Europa y Norteamérica. El 55% de los sistemas MBR que están en operación utilizan membranas sumergidas mientras que el resto trabajan con membranas externas (Cicek, 2003).



Los sistemas MBR son recomendados en situaciones en donde el espacio del que se dispone para la planta de tratamiento es limitado.

Esta tecnología ha sido utilizada en el tratamiento de aguas residuales domésticas, municipales y sintéticas así como en las provenientes de industrias de aceites y alimentos, con una eficiencia de remoción de DQO no menor al 80% (Brindle y Stephenson, 1996). Los MBR con módulos de membrana internos (sumerged modules) son especialmente utilizados para tratar aguas residuales municipales y las diferencias de presión a través de la membrana así como las velocidades de flujo son bajas. Los MBR con módulos externos (side stream), son operados a altas velocidades y trabajan con presiones arriba de 5 bars, por lo tanto se requiere de un consumo energético alto (Rosenberger, 2001)

### 4.3.4 Ventajas y desventajas

#### Ventajas

- La sedimentación del tratamiento terciario es reemplazada por el uso de módulos de micro o ultrafiltración (Rosenberger, 2001).
- La retención de toda la materia suspendida, de la mayoría de los compuestos solubles, bacterias y virus dentro del reactor permiten generar un efluente de muy alta calidad (Cicek, 2003, Rosenberger, 2001).
- La posibilidad de eliminar bacterias y virus genera un efluente estéril, eliminando así la etapa de desinfección (Cicek, 1998a; 2003).
- Toda la biomasa del reactor es retenida dentro del mismo por los filtros de membrana, lo cual permite un mejor control del tiempo de retención celular y el tiempo de retención hidráulica y por lo tanto el óptimo control de la actividad biológica y de la población microbiana (Cicek, 2003).
- Al ser un sistema compacto no requiere de superficies grandes.



### Desventajas

- El costo de las unidades de filtración con membrana es alto.
- El consumo de energía es 10 veces mayor que el sistema de lodos activados convencional.
- Se requiere de limpieza frecuente de la membrana para lo cual en algunos casos el proceso debe suspenderse, además del consumo de agua limpia y algunas sustancias químicas para este fin.
- Las propiedades de los lodos generados no permiten que sean filtrados y sedimentados fácilmente.



## CAPÍTULO 5. COMPARACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL

La selección de una o varias tecnologías de tratamiento de aguas residuales implica el análisis de aspectos importantes como son los financieros (básicos para llevar a cabo los trabajos de diseño, construcción y operación de la planta), de operación (importantes para determinar el funcionamiento y eficiencia del proceso), de mantenimiento (debido a la necesidad del buen funcionamiento de la planta, que depende del estado físico de los equipos), de necesidad (se debe contar con instalaciones adecuadas que permitan tener condiciones de operación y mantenimiento óptimas), entre otras. Esto permite comparar y evaluar de manera objetiva cada una de las tecnologías a elegir.

Existen diferentes metodologías para la evaluación de alternativas tecnológicas. Las más representativas son las siguientes: Castellanos y Cano (1979), Sharif y Sundarajan (1983) y Rodríguez y Solleiro (1991). Estas tres metodologías tienen una aplicación adecuada para proyectos en donde la tecnología a adquirir es de proceso (Moreno *et al*, 1998) y toman en cuenta aspectos técnicos, contractuales y económicos.

Castellanos y Cano (1979) proponen una evaluación técnica, una contractual y una económica. Pero definen mejor los criterios a considerar en la evaluación técnica ya que se enfoca principalmente a proyectos en donde la tecnología involucrada es de proceso. No definen la forma de ponderar cada aspecto de la evaluación ni la escala para calificar cada criterio, pero establecen que tanto la evaluación como la calificación están basadas en consideraciones subjetivas y la importancia relativa depende del criterio del evaluador, evaluación denominada como técnica matricial (Moreno *et al*, 1998).

La evaluación técnica involucra el análisis del proceso (bases del diseño, características, flexibilidad y condiciones de operación del proceso, mantenimiento), de documentación técnica así como servicios adicionales y experiencia técnica



administrativa. La evaluación contractual implica el análisis de la tecnología, de los servicios técnicos y profesionales entre otros aspectos. Finalmente en la evaluación económica se toma en cuenta la inversión en equipo y materiales (materias primas, servicios auxiliares, reactivos químicos, etc.), mantenimiento, costo de ingeniería y licenciamiento, capital de trabajo.

Este tipo de metodologías de evaluación son diseñadas para el estudio profundo y detallado de cada una de las alternativas tecnológicas de proceso. Para realizar el presente estudio se toman en cuenta sólo algunos de los aspectos que proponen Castellanos y Cano (1979) con la finalidad de proporcionar una visión muy general de las características de cada tecnología.

Se tomaron en cuenta sólo aspectos que se consideraron de mayor importancia de tecnología. Las características técnicas que se comparan son principalmente eficiencias de remoción de contaminantes, equipo y reactivos necesarios, así como algunos parámetros de diseño y operación siempre que se contó con estos datos. Las características económicas (analizadas de manera muy global) son la inversión inicial así como los costos de operación (salarios, gastos generales, suministros, administración de operación, servicios, compuestos químicos, seguridad ocupacional y entrenamiento, pruebas de laboratorio y manejo de sólidos) y mantenimiento, lo cuales en algunos casos son reportados como porcentaje de la inversión inicial. Los aspectos ambientales se refieren básicamente a la cantidad y calidad de lodo residual que se genera durante el proceso. Cabe mencionar que no en todos los casos se cuentan con datos específicos de la producción de lodos así como de sus características.

### **5.1 PROCESOS BIOLÓGICOS**

Los procesos biológicos comparados en este estudio son los sistemas de lodos activados, sistemas de reactores discontinuos secuenciales y de bio-reactores de membrana. La tecnología MBR es un sistema clasificado como fisicoquímico avanzado





principalmente por la función de las membranas dentro del mismo, pero una parte esencial de este sistema es el reactor biológico, por esta razón en el presente estudio, los sistemas MBR son incluidos dentro de la comparación de los procesos biológicos.

A pesar de que cada una de estas tecnologías se fundamentan en la descomposición bacteriana de un sustrato orgánico, operan de diferente manera lo cual se ve reflejado principalmente en la estructura del tren de tratamiento en general así como las eficiencias de remoción de contaminantes. A continuación se muestran las características más importantes de cada tecnología con el fin facilitar la apreciación de las diferencias y similitudes entre cada una.

### **5.1.1 Comparación técnica**

Cada tecnología, por sus características, requiere de cierta maquinaria, equipo y reactivos para operar, además de presentar diferentes eficiencias de remoción de contaminantes.

En la tabla 5.1 se concentran las características técnicas más importantes de cada tecnología que permiten identificar las diferencias y similitudes entre cada una. El fundamento principal de estas tres tecnologías es la biodegradación de la materia orgánica pero en el caso de los sistemas con bio-reactores de membrana el fundamento se extiende al proceso de ultra o microfiltración mediante membranas. Los tres sistemas operan bajo un régimen completamente mezclado, excepto el sistema de lodos activados convencional que puede o no estar bajo éste régimen.

Estas tres tecnologías son utilizadas principalmente para la eliminación de materia orgánica con eficiencias que llegan a ser de más del 90%. Todas se han utilizado en el tratamiento de aguas residuales domésticas, municipales e industriales aunque cada una con sus respectivas limitantes, las cuales están en función de la operación y diseño de los sistemas de tratamiento.



Tabla 5.1. Características técnicas (Procesos biológicos).

		LODOS ACTIVADOS (convencional)	LODOS ACTIVADOS (aireación extendida)	REACTORES DISCONTINUOS SECUENCIALES	BIO-REACTORES DE MEMBRANA
<b>Fundamento</b>		Capacidad natural de los microorganismos para degradar materia orgánica contaminante en presencia de oxígeno (procesos aerobios)			
<b>Recomendado para caudales</b>		Municipal e industrial con cargas orgánicas bajas	Municipal e industrial	Intermitentes o reducidos, industriales domésticos o municipal	Municipal e Industrial
<b>Aplicaciones</b>		Eliminación de DBO	Eliminación de DBO y Nitrificación	Eliminación de DBO	Eliminación de DBO, materia orgánica refractaria. Potabilización
<b>Parámetros de diseño y operación</b>	<b>Fuente bibliográfica</b>	Metcalf y Eddy, 1996	Metcalf y Eddy, 1996	EPA, 1999	Brindle y Stephenson, 1996
	<b>Régimen de flujo</b>	Flujo pistón o completamente mezclado	Completamente mezclado	Completamente mezclado	Completamente mezclado
	<b><math>\Theta</math> (horas)</b>	4 – 8	18 - 24	6 - 14	2 – 52
	<b>F/M (kgDBO<sub>5</sub>/kg SSLV)/ día</b>	0.2 – 0.4	0.05 – 0.15	0.15 - 0.6	Bajos
	<b><math>\Theta_c</math> (días)</b>	4 – 15	20 - 30	<1	<1
	<b>SSLM (mg/L)</b>	1,500 - 3,000	3,000 – 6,000	2,000 - 4,000	100 <sup>a</sup>
	<b>V<sub>L</sub> (kgDBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>)</b>	0.3 – 0.6	0.16 – 0.40	0.1 – 0.3	0.2 – 0.6
<b>Q<sub>r</sub>/Q</b>	0.25 – 0.5	0.75 – 1.5	No aplica	No aplica	
<b>Etapas del proceso (tratamiento secundario)</b>	-Oxidación y síntesis -Sedimentación			-Llenado -Oxidación y síntesis -Sedimentación -Vaciado	-Oxidación y síntesis -Sedimentación -Filtración
<b>Equipo principal (tratamiento completo)</b>	-Rejilla -Desarenador -Sedimentador prim. -Tanque de aireación -aireador, mezclador -Sedimentador sec. -Tanque de cloración -Sistema de control			-Rejilla -Desarenador -Unidad SBR -Aireador, mezclador -Filtro -Tanque de cloración -Sistema de control	-Rejilla -Desarenador -Tanque de aireación -aireador, mezclador -Módulo de membrana -Sistema de control
<b>Reactivos necesarios (operación)</b>	Cloro gas para desinfección			Cloro gas para desinfección	-



		LODOS ACTIVADOS (convencional)	LODOS ACTIVADOS (aireación extendida)	REACTORES DISCONTINUOS SECUENCIALES	BIO-REACTORES DE MEMBRANA
Eficiencias de remoción de contaminantes %	Fuente bibliográfica	Metcalf y Eddy, 1996 EPA, 1999	Metcalf y Eddy, 1996	Metcalf y Eddy, 1996 EPA, 1999	N.I. Galli <i>et al</i> , 2003
	DBO total	85-95	75 - 95	85-95	98
	SST	85-95	75 - 95	85-95	99 <sup>b</sup>
	SSV	NR	NR	NR	99
Fósforo total en el efluente		5-8 mg/L	NR	5-8 mg/L	NR
Nitrógeno total en el efluente		1-2 mg/L	NR	1-2 mg/L	90 <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Sólidos en suspensión volátiles en el licor mezclado.

<sup>b</sup> Katayon *et al*, 2004.

<sup>c</sup> Porcentaje de remoción

Tanto el sistema de lodos activados (convencional y aireación extendida) como los sistemas SBR no tienen efectos significativos sobre patógenos, bacterias y virus presentes en el agua residual por lo que el efluente de este proceso, después de ser sedimentado y filtrado debe ser desinfectado. Los sistemas MBR además de ser altamente eficientes en la remoción de materia orgánica, también lo son en la remoción de compuestos orgánicos refractarios, patógenos, y virus lo cual representa una ventaja significativa ante los procesos biológicos convencionales y el sistema SBR.

Los sistemas SBR, MBR y lodos activados convencionales requieren de superficies menores que el sistema de lodos activados con aireación extendida. De estos tres sistemas el que requiere menor superficie es el sistema MBR integrado porque no requiere sedimentación secundaria y filtración posterior al tratamiento, ya que esta se lleva a cabo dentro del reactor, además de no requerir módulo de desinfección.

A continuación siguen los sistemas SBR, los cuales pueden no requerir sedimentador primario y nunca requieren sedimentador secundario pero si es necesario un módulo de



filtración y desinfección. Por último se tiene al sistema de lodos activados convencional que requiere de sedimentación secundaria, filtración y desinfección.

En cuanto a los sistemas de aireación extendida el reactor de aireación debe ser mucho más largo para poder dar este efecto, además de requerir sedimentación secundaria, filtración y desinfección. La ventaja de estos sistemas es la producción de una menor cantidad de lodo en exceso ya que el tiempo medio de residencia celular es mayor que en los otros sistemas biológicos. La ventaja más relevante de los sistemas con aireación extendida es la producción menor de lodos residuales (el tiempo medio de residencia celular es mayor).

### 5.1.2 Comparación económica

La inversión inicial así como los costos de operación y mantenimiento son distintos para cada tecnología y entre otras cosas dependen del tamaño de la planta y de las características del sistema.

La diferencia en la inversión inicial de plantas de tratamiento de aguas residuales con tecnologías SBR y lodos activados de tamaños comparables es poco significativa. Ya que, aunque la construcción de los tanques de aireación y los equipos son similares, el sistema operativo de lodos activados no es tan complejo como el que se requiere en los sistemas SBR.

Los costos de operación y mantenimiento de un sistema SBR son similares al sistema de lodos activados convencional, esto se debe a que los requisitos laborales y de mantenimiento disminuyen en los sistemas SBR ya que no se requieren sedimentadores, bombas de recirculación de lodos y otros equipos que son necesarios en lodos activados.



Los costos de mantenimiento de los interruptores y las válvulas automáticas que controlan la secuencia de operación pueden ser mayores que la de los sistemas convencionales de lodos activados (EPA, 1999). En la tabla 5.2 se han resumido los datos económicos de cotizaciones reales de plantas de tratamiento de aguas residuales para una capacidad de 500 L/s.

**Tabla 5.2. Estimados de inversión y costos para sistemas MBR y lodos activados.**

Estimados de Inversión		Costos de operación y mantenimiento	
Lodos Activados	Sistemas MBR	Lodos Activados	Sistemas MBR
<b>-Tratamiento Primario para 900lps</b> USC CY Cribado Mecánico Automático 11,589 Desarenador / Desgrasador 181,111 Filtro 1037,278 Reactor Anaerobio 103,500 <b>Total: <u>1,437,278</u></b>	<b>-Tratamiento Primario para 900lps</b> USC CY Cribado Mecánico Automático 11,589 Desarenador / Desgrasador 181,111 Filtro 1037,278 Reactor Anaerobio 103,500 <b>Total: <u>1,437,278</u></b>	-Costos anuales Pesos M.N. Personal de operación Energía eléctrica 2,386,350 Reactivos Químicos 1,542,778 Mantenimiento de equipo 555,955 4,027,722	-Costos anuales Pesos M.N. Personal de Operación Energía eléctrica 2,386,350 Reactivos químicos 1,326,417 Mantenimiento de equipo 555,955 4,699,011
-Tratamiento secundario para 500lps Sistema de Aireación 4,175,000 Clarificación 1,366,200 Retorno de Lodo 360,000 Filtración 1,368,700 <b>Total <u>7,269,900</u></b>	-Tratamiento secundario para 500lps Sistema de Aireación MBR 13,367,500 Retorno de Lodo 385,400 Bombeo a MBR 170,300 Bombeo a Purga de Lodos 102,500 <b>Total: <u>14,025,700</u></b>	Volumen de agua producida (500 lps) 15,768,000 m <sup>3</sup> /año Costo O/M 0.60 / m <sup>3</sup> Costo por amortización 1.32 / m <sup>3</sup>	Volumen de agua producida (500 lps) 15,768,000 m <sup>3</sup> /año Costo O/M 0.63 / m <sup>3</sup> Costo por amortización 1.12 / m <sup>3</sup>
<b>Inversión Inicial: <u>8,707,178</u></b>	<b>Inversión Inicial: <u>15,462,978</u></b>	<b>Costo Total: <u>1.90 / m<sup>3</sup></u></b>	<b>Costo total: <u>1.75 / m<sup>3</sup></u></b>

Con los datos económicos se muestran en la tabla anterior, se observa que el equipo que requieren los sistemas MBR tiene un costo 48% mayor que el requerido por los



sistemas de lodos activados. En el caso particular del tratamiento de aguas residuales municipales con fines de reúso agrícola e industrial, no se requiere el pretratamiento y postratamiento que se propone en la tabla 5.2.

El pretratamiento es prácticamente el mismo en las dos tecnologías, la diferencia principal radica en el postratamiento ya que el sistema de lodos activados requiere además del proceso de filtración, una etapa de desinfección, las cuales no son requeridas en los sistemas MBR. Por esta razón la inversión inicial que requiere la tecnología MBR es entre 40 y 50% mayor que la de un sistema de lodos activados convencional y un sistema SBR.

### 5.1.3 Comparación ambiental

La función básica del tratamiento biológico es convertir los compuestos orgánicos en bióxido de carbono y nuevas bacterias. Estas células tienen un modelo de crecimiento, el cual puede abordarse estudiando la variación con el tiempo de la masa de microorganismos (Metcalf y Eddy, 1996).

En este modelo de crecimiento existen cuatro fases; la fase de latencia en la cual las bacterias se aclimatan al nuevo medio, la fase de crecimiento exponencial debido al exceso de alimento alrededor de los microorganismos, la fase de crecimiento decreciente al disminuir la disponibilidad de alimento, y por último la fase de respiración endógena durante la cual las bacterias metabolizan su propio protoplasma sin reposición (Metcalf y Eddy, 1996).

Parte de las nuevas células bacterianas generadas durante este proceso se convierten en lodo en exceso. La cantidad de biomasa producida durante este proceso depende en mucho del tiempo medio de retención celular y basados en la curva de crecimiento bacteriano, se puede determinar que cuando se trabaja con tiempos cortos de retención celular existe una mayor cantidad de masa bacteriana dentro del reactor y en el efluente



del mismo, por lo tanto una mayor cantidad de lodo en exceso ya que se trabaja dentro de la fase de crecimiento exponencial. Cuando el tiempo de retención celular es más largo se produce menor cantidad de lodos, ya que la masa bacteriana es menor al situarse en la fase endógena, que es la fase de muerte de las células. La curva de crecimiento bacteriano se muestra en la figura 5.1.



**Figura 5.1. Curva de crecimiento bacteriano, en términos de masa de microorganismos.**

El sistema de lodos activados convencional trabaja con tiempos medios de retención celular cortos (4-15 días) lo cual implica una alta producción de lodos en exceso. En cuanto al sistema de lodos activados con aireación extendida, éste genera menor cantidad de lodos residuales ya que trabaja con tiempos medios de retención celular grandes (20-30 días) llegando la fase endógena del crecimiento bacteriano (muerte) y por lo tanto la masa de microorganismos disminuye.

Los sistemas SBR tienen una flexibilidad operativa grande lo cual permite que pueda ser ajustado para simular cualquier proceso de lodos activados, incluso un sistema de aireación extendida, por esta razón la producción de lodos generadas con este sistema dependen de las condiciones de operación.

En los sistemas de bio-reactores de membrana, la separación y retención de la biomasa se lleva a cabo a través del módulo de membrana, de manera que el tiempo de



retención hidráulica y celular son independientes, así el tiempo de retención celular puede alargarse tanto como se desee. La producción de lodos en los sistemas MBR es reducido entre el 28 y 68% comparado con los sistemas de lodos activados convencionales (Liu, 2003).

### 5.2 PROCESOS FISICOQUÍMICOS

Los procesos fisicoquímicos analizados en este estudio son el tratamiento primario avanzado y el método de Fenton los cuales han sido descritos anteriormente. En ambas tecnologías de tratamiento de aguas se lleva a cabo el proceso de coagulación-floculación como removedor de contaminantes del agua residual, pero la principal diferencia que existe entre ellas es que en el método de Fenton se lleva a cabo también la oxidación de los contaminantes.

#### 5.2.1 Comparación técnica

Entre los dos procesos fisicoquímicos estudiados en este documento, existen grandes diferencias que implican una forma de operación distinta con requerimientos diferentes y eficiencias diferentes. Algunas de las características principales se mencionan en la tabla 5.3. Ambas tecnologías han sido utilizadas en el tratamiento de aguas residuales domésticas, municipales e industriales con buenos resultados.

El efecto que tiene el tratamiento primario avanzado es primordialmente sobre los compuestos orgánicos suspendidos y no sobre los contaminantes disueltos, especialmente los recalcitrantes. Sin embargo, el método de Fenton, además de actuar sobre los contaminantes suspendidos también remueve contaminantes disueltos, ya que además de llevar a cabo el proceso de coagulación floculación, se lleva a cabo el proceso de oxidación.





Los porcentajes de remoción de los principales contaminantes del agua residual son mayores utilizando en método de Fenton que con el sistema TPA. Con este método, la remoción de contaminantes es mayor en los siguientes porcentajes: 35% de DQO, 21% de SST, turbiedad 30%, coliformes fecales 50%. Lo cual genera un efluente que no requiere desinfección posterior.

Estas características determinan el equipo que requieren los sistemas de tratamiento. El tratamiento primario que debe darse al caudal para después ser tratado con alguna de estas dos tecnologías puede ser el mismo en ambos casos. Sin embargo los requerimientos de equipo y reactivos son diferentes entre sí, al llevarse a cabo el tratamiento secundario y el postratamiento.

**Tabla 5.3. Características técnicas (procesos fisicoquímicos).**

	TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO	MÉTODO DE FENTON
<b>Fundamento</b>	Desestabilización de la materia orgánica suspendida por adición de reactivos químicos	Oxidación y desestabilización de la materia orgánica y compuestos recalcitrantes por adición de reactivos químicos.
<b>Características del caudal a tratar</b>	Municipal, Industrial	Municipal, industrial
<b>Aplicaciones</b>	Eliminación de DBO disuelta. Remoción de huevos de helmintos y metales pesados	Eliminación de materia orgánica inorgánica. Eliminación completa de coliformes fecales.
<b>Etapas del proceso (dentro del reactor)</b>	-coagulación-floculación -sedimentación	-Ajuste a pH 3-3.5 -coagulación-floculación-oxidación avanzada -Neutralización -sedimentación
<b>Equipo principal</b>	-Rejilla -Criba (opcional) -Desarenador -Sedimentador primario -Tanque mezclado rápido -Tanque mezclado lento -Sedimentador secundario -Filtro -Tanque de cloración	-Rejilla -Criba (opcional) -Desarenador -Sedimentador primario -Tanque de acondicionamiento -Tanque mezclado rápido -Tanque mezclado lento -Sedimentador secundario -Filtro
<b>Reactivos necesarios</b>	-Coagulante ( $Al_2(SO_4)_3$ o $FeCl_3$ ) -Floculante (polímero aniónico) -Cloro gas	- $H_2SO_4$ - $FeSO_4$ y $H_2O_2$ -NaOH



Eficiencias de remoción de contaminantes %	Fuente bibliográfica	Jiménez y Chávez, 1997	Durán <i>et al.</i> , 2003
	Tipo de afluente	Municipal	Municipal
	DQO total	37	57
	SST	70	89
	SSV	65	NR
	Color	NR	75
	Turbiedad	68	96
	Coliformes fecales	49	99.9
	Huevos de helmintos	94	95
	Nitrógeno total	15	20
	Aluminio	61	NR
	Hierro	72	NR
	Níquel	63	NR
	Zinc	67.2	NR

NR: No reportado

El TPA requiere de dos tanques de mezclado en los cuales se lleva a cabo el proceso de coagulación floculación, de un sedimentador secundario y un módulo de filtración además de un tanque desinfección. El método Fenton además de requerir de dos tanques de mezclado, un sedimentador y de un módulo de filtración, requiere un tanque de acondicionamiento del afluente antes del tratamiento, pero no requiere del tanque de desinfección.

En ambas tecnologías es necesario contar con bombas dosificadoras de reactivos y para purga de lodos residuales. Estos sistemas requieren de superficies amplias por lo que se recomiendan para casos en los que la superficie no es limitada, Los requerimientos de superficie son muy similares para estas dos tecnologías.

Tanto el TPA como el método de Fenton requieren reactivos químicos para llevarse a cabo. El tratamiento primario avanzado utiliza coagulante, floculante y cloro gas para desinfección, mientras que el método de Fenton necesita ácido sulfúrico para acidificar



el caudal a tratar, sulfato ferroso, peróxido de hidrógeno e hidróxido de sodio para neutralizar el efluente.

### 5.2.2 Comparación económica

La inversión inicial y los costos de mantenimiento entre ambas tecnologías varían muy poco. La mayor diferencia radica en el costo de la operación (reactivos) y en la producción de lodos.

Como se mencionó anteriormente el método Fenton produce 10% menor cantidad de lodos que los generados con el tratamiento primario avanzado. Por otra parte el costo del reactivo de Fenton es 6 veces mayor con respecto al coagulante requerido por el sistema de tratamiento primario avanzado (González, 2001). De acuerdo con González, costo de los reactivos requeridos para el sistema de tratamiento primario avanzado es de  $\$0.12/\text{m}^3$  mientras que el costo del reactivo de Fenton es de  $\$0.7/\text{m}^3$ .

### 5.2.3 Comparación ambiental

Las características de los lodos producidos en cada tratamiento son diferentes debido a que los reactivos de cada uno son distintos. A continuación se muestran los valores de algunas de las características más importantes de los lodos generados en cada proceso al tratar aguas residuales domésticas.

Es importante mencionar que estos valores dependen de las características del caudal tratado. La tecnología que genera menor cantidad de lodos es el método de Fenton, ya que la producción de estos residuos es 10% menor a la producida con el tratamiento primario avanzado. La calidad de los lodos generados con el TPA, de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002, es buena y de clase C. Por el contrario, los residuos sólidos producidos con el método Fenton son de mayor calidad (clase B).



**Tabla 5.4. Características de los lodos generados en el TPA y el método de Fenton.**

	TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO	MÉTODO FENTON	LÍMITES PERMITIDOS	
			NOM-004-SEMARNAT-2002 Buenos, clase B	NOM-004-SEMARNAT-2002 Buenos, clase C
Fuente bibliográfica	Ramírez-Zamora <i>et al.</i> ,2001,	Ramírez-Zamora <i>et al.</i> ,2001,		
Producción de lodos fisicoquímicos (g ST/L)	0.19	0.17	-	-
pH	5.92	3.98	-	-
SRF (m/Kg)	$1.55 \times 10^{13}$	$1.92 \times 10^{13}$	-	-
Coliformes Totales (NMP/g ST)	$6.0 \times 10^7$	0	-	-
Coliformes Fecales (NMP/g ST)	$2.0 \times 10^6$	0	< 1 000	< 2 000 000
<i>Salmonella spp</i> (NMP/gST)	0	0	< 3	< 300
Huevos de Helmintos (HH/g ST)	38	22	< 10	< 35
Arsénico (mg/kg)	3.64	2.46	75	75
Cadmio (mg/kg)	0.175	0.13	85	85
Cromo (mg/kg)	1.81	1.21	3 000	3 000
Cobre (mg/kg)	12.5	11.41	4300	4300
Plomo (mg/kg)	3.43	3.57	840	840

En el análisis de cada una de las cinco tecnologías estudiadas en este documento es importante resaltar ciertas características, por esta razón en la tabla 5.5 se muestran los principales aspectos de cada una y cuya evaluación se basa en la información dada en los capítulos anteriores.

En cuanto a las características económicas de cada tecnología se considera que la tecnología que requiere una mayor inversión inicial es el sistema MBR ya que el módulo de membrana es muy costoso. A continuación siguen los procesos fisicoquímicos cuya inversión inicial es similar entre ellos, pero no llega a ser tan alta como la requerida en los sistemas MBR. Los sistemas que requieren de menor inversión inicial son los sistemas de lodos activados y SBR.



**Tabla 5.5. Resumen de las características más importantes de cada tecnología.**

		Procesos biológicos				Procesos fisicoquímicos	
		Lodos activados convencional	Lodos activados aireación extendida	Sistemas SBR	Sistemas MBR	Tratamiento primario avanzado	Método Fenton
Aplicación		Eliminación de DBO			Eliminación de DBO, materia orgánica refractaria. Potabilización	Remoción de metales pesados	Remoción de compuestos tóxicos, recaicitrantes
Aspectos técnicos	Calidad del efluente	buena	buena	buena	muy buena	buena	muy buena
	Requerimiento de terreno	limitado	amplio	limitado	limitado	amplio	amplio
	Consumo de energía	moderado	moderado	moderado-alto	alto	moderado	moderado
Aspectos económicos	Inversión inicial	moderada	moderada	moderada	alta	moderado-alta	moderada-alta
	Costos de operación y mantenimiento	moderado	moderado	alto	moderado	moderado	alto
Aspectos ambientales	Producción de lodos	muy alta	baja	moderada	baja	moderada	baja
Reúso (recomendado)	Agrícola	✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓	✓✓✓	✓✓
	Industrial	✓	✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓	✓✓

Los costos de operación y mantenimiento dependen generalmente de los reactivos que se requieren en el proceso así como los sistemas de control. Por estas razones los sistemas SBR y método Fenton son más caros, el primero al necesitar de sistemas más sofisticados de control, interruptores y válvulas automáticas; y el segundo al requerir reactivos que son caros como lo es el peróxido de hidrógeno.

El consumo de energía en el caso de las procesos fisicoquímicos es similar, ya que no hay variaciones significativas en la estructura del proceso. En cuanto a los sistemas biológicos, los procesos que consumen mayor cantidad de energía son los sistemas SBR y MBR, lo cual se debe principalmente al buen funcionamiento de los equipos



(sistemas de control y aireación en el primer caso; y sistemas de aireación y la conservación de un determinado gradiente de presión en el segundo).

El tratamiento primario avanzado y el método Fenton son las tecnologías que generan caudales más adecuados para el reúso en riego agrícola, ya que la cantidad de microorganismos que existen en éstos no representa riesgos a la salud, además de que la remoción de nutrientes es mínima (aproximadamente 15%).

La tecnología más adecuada para generar efluentes para reúso industrial es el sistema MBR, ya que retiene la mayor cantidad de sustancias que pueden causar problemas en los equipos.



## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales son indispensables para minimizar el impacto ambiental que éstas tienen sobre los cuerpos receptores, ya que eliminan la mayor parte de los contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el agua residual. Un aspecto importante del tratamiento de aguas es el hecho de que éstas pueden ser reutilizadas en diferentes actividades como lo son las industriales o agrícolas. Cualquiera de las tecnologías analizadas en los capítulos anteriores generan efluentes de calidad suficiente para reutilizarse, aunque dependiendo de las características de cada una, puede o no requerirse de un postratamiento para producir agua tratada para este fin.

Para la elección y diseño de un tren de tratamiento de aguas residuales se deben conocer de antemano las características del agua residual a tratar así como los requerimientos del efluente. La elección adecuada de un proceso de tratamiento de aguas depende en gran medida del análisis de las características de las alternativas tecnológicas. Es importante conocer la disposición final del agua tratada ya que, en base a ésta, se determina si el caudal que genera el tratamiento secundario requiere de algún tipo de postratamiento (tratamiento terciario), si es así, los equipos requeridos para este fin implican un incremento en la inversión inicial así como en los costos de operación y mantenimiento.

Para realizar la evaluación de las cinco diferentes tecnologías de tratamiento de aguas residuales se tomaron en cuenta las características técnicas, económicas y ambientales de cada una. Las características técnicas que fueron analizadas son la calidad del efluente generado así como principal equipo requerido. Los aspectos económicos comparados fueron la inversión inicial y los costos de operación y mantenimiento. Las características ambientales se limitan a la producción y características de los lodos producidos durante el tratamiento.



Entre las tecnologías estudiadas existen algunas que requieren de una inversión inicial mayor y cuyos costos de operación también son mayores, las cuales a priori no resultan atractivas. Este es el caso de los sistemas MBR y del método Fenton, pero al analizar y comparar las características de ambos es evidente que existe un equilibrio entre los costos de inversión, operación, calidad del efluente y el objetivo del tratamiento. En el caso de los sistemas MBR requieren de una inversión inicial muy alta debido al módulo de filtración con membrana, sin embargo representa grandes ventajas sobre los sistemas convencionales, ya que se elimina el módulo de sedimentación secundaria y de desinfección al generar agua tratada de excelente calidad y que puede ser reutilizada en diversas actividades.

El método Fenton es otra de las tecnologías cuyos costos de inversión y operación son elevados debido a la necesidad de ajustar el pH del caudal antes y después del tratamiento, así como al uso de reactivos caros (peróxido de hidrógeno), pero este proceso brinda una ventaja muy importante sobre los demás al generar un efluente desinfectado apto para reúso, produciendo poca cantidad de lodos residuales.

Cada tecnología tiene características distintas entre sí, así como ventajas y desventajas lo cual hace que sean recomendadas en determinadas circunstancias. El proceso biológico de depuración de aguas residuales más eficiente en la remoción tanto de materia biológica, como de compuestos recalcitrantes, patógenos y virus es el sistema MBR, esto es gracias al sistema de ultra o microfiltración, genera un efluente de muy alta calidad (no hace falta desinfección). En el aspecto financiero, las tecnologías que requieren de una inversión inicial menor son las de lodos activados y sistemas SBR, que comparados con los sistemas MBR, requieren de una inversión 50% menor aproximadamente.

La generación de lodos residuales en los procesos biológicos depende en gran medida de las características de operación del sistema, razón por la cual es difícil determinar cuál de los procesos biológicos estudiados produce menor cantidad de este residuo.





A priori el sistema MBR es la tecnología que genera menor cantidad de residuos sólidos, debido a la independencia entre el tiempo de retención hidráulica y celular. En cualquiera de los tres casos (lodos activados, sistemas SBR y MBR) los lodos generados deben ser acondicionados para su disposición final.

El sistema de lodos activados convencional es muy eficiente para tratar caudales municipales con poca carga orgánica y sin variaciones de la misma; cuando el lugar en el que se propone realizar la planta no es muy amplio y tiene limitaciones de terreno. Los sistemas de lodos activados de aireación extendida se recomiendan cuando el espacio disponible para la planta no es problema y se busca una producción de lodos menor que la generada en los tratamientos convencionales.

Por las características del proceso, los sistemas SBR se recomiendan para tratar caudales intermitentes o provenientes de pequeñas comunidades. Este sistema es una buena opción si el lugar en el que pretende ser instalado tiene limitaciones de terreno. El caudal generado con esta tecnología puede ser reutilizado en riego agrícola así como algunas actividades industriales.

Los sistemas MBR son recomendados para tratar todo tipo de efluentes (domésticos, municipales e industriales) en donde el efluente requerido debe ser de muy alta calidad, para sitios en los que se tienen limitaciones de terreno y cuando existe interés en reducir la producción de lodos residuales.

En cuanto a las diferencias técnicas entre los procesos fisicoquímicos estudiados, tratamiento primario avanzado y método Fenton, la más sobresaliente es el proceso de oxidación de los contaminantes presentes en el agua residual que se lleva a cabo en éste último, generando un efluente desinfectado y produciendo una menor cantidad de lodo. La desventaja que presenta el método Fenton respecto al TPA es la necesidad de disminuir el pH antes del tratamiento para que éste se lleve a cabo de forma óptima, y el neutralizar el efluente después del mismo, lo cual se ve reflejado en los costos de



operación ya que se requieren otros reactivos extras además del reactivo Fenton. En cuanto a los costos de inversión, éstos son prácticamente iguales en ambos casos ya que a pesar de que el tratamiento primario avanzado requiere del módulo de cloración que el método Fenton no, éste último requiere los módulos de acidificación y neutralización.

Con respecto a las ventajas ambientales, el sistema que genera una menor cantidad de lodos residuales y de mejor calidad es el método Fenton, ya que produce una cantidad de lodos 10% menor que la generada con el TPA. Ambas tecnologías generan efluentes que por sus características pueden ser reutilizados eficazmente en el área agrícola. El caudal producido con ambas tecnologías puede reutilizarse también en el área industrial, aunque se debe tener las precauciones pertinentes para evitar problemas de corrosión o incrustación que pueden ser producidos si existen remanentes de los compuestos químicos utilizados en estos procesos.

El tratamiento primario avanzado es altamente recomendado para tratar caudales con altas cargas de materia orgánica como los municipales e industriales siempre y cuando no se tengan limitaciones de terreno. El método Fenton es muy eficiente para tratar caudales con gran cantidad de materia orgánica e inorgánica como lo industriales, aunque puede utilizarse con cualquier tipo de aguas residuales siempre y cuando no se tengan limitaciones económicas y de terreno. El efluente generado es de muy alta calidad y la producción de lodos es mínima.

Este trabajo representa punto de partida para el desarrollo de investigaciones más detalladas al respecto de la calidad del agua tratada para todos los reúsos posibles utilizando éstas y otras tecnologías, tomando en cuenta el análisis de las características más importantes de las aguas residuales que son reguladas por la normatividad mexicana, (conductividad ecléctica, etc). Los sistemas MBR no han sido estudiados a profundidad en nuestra universidad pero valdría la pena que se desarrollaran proyectos de investigación al respecto que permitan explorar nuevas tecnologías.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Bishop, D. F, (1968). *Hydrogen Peroxide Catalytic Oxidation of Refractory Organics in Municipal Waste Waters*. Ind. Eng. Chem., Process Design & Development, **7**, 110-117.
2. Brindle, K., Stephenson, T., (1996). *The application of membrane biological reactors for the treatment of wastewaters (mini-review)*. Biotechnology and Bioengineering , **49**, 601-610.
3. Castillo, G., Alcota, C., Mena, M. P., (2002). *Acondicionamiento de biosólidos mediante compostaje*. Departamento de Ingeniería Civil. U de Chile.
4. Cicek N. (2003). *A review of membrane bioreactors and their potential application in the treatment of agricultural wastewater*. Canadian Biosystems Engineering, **45**, 6.37-6.49.
5. Comisión Nacional del Agua, (2003). *Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales en Operación, Diciembre 2003*.
6. Dégremont, (1979). *Water Treatment Handbook*. A Halsted Press Book. John Wiley and Sons, Inc. 4<sup>th</sup> edition. New York.
7. Durán Moreno, A., González Lorenzo, E., Durán de Bazúa, C., Malpica de la Torre, J. (2003). *Fenton's reagent and coagulation-flocculation as pretreatments of combined wastewater for reuse*. Water Science and Technology, **47 (11)**, 145-151.
8. Eckenfelder Jr., W., Patoczka, J., Watkin, A., (1985). *Wastewater treatment*. Chemical Engineering.
9. Envicare (2002). *SBR, High efficient waste water treatment*. UK. ([www.envicare.com/indstik\\_SBR\\_UK.pdf](http://www.envicare.com/indstik_SBR_UK.pdf))
10. Galil N.I., Sheindorf Ch., Stahl N., Tenenbaum A., Levinsky Y. (2003). *Membrane bioreactors for final treatment of wastewater*. Water Science and Technology, **48**, 103-110.
11. González, E (2001). *Tratamiento de aguas residuales por medio de procesos fisicoquímicos para la recarga artificial del acuífero del Valle de México*. Tesis de maestría, Facultad de Química, UNAM.



12. Hermanowicz, S. W., Asano, T., (1999). Able wolman's "the metabolism of cities" revisited: a case for water recycling and reuse. *Water Science and Technology*, **40**, 29-36.
13. Jiménez, B., Chávez, A., (1997). *Treatment of Mexico City wastewater for irrigation purposes*. *Environmental Technology*, **18**, 721-730.
14. Jiménez, B., Chávez, A., (1998). *Removal of helminth eggs in an advanced primary treatment with sludge blanket*. *Environmental Technology*, **19**, 1061-1071.
15. Jiménez, B., Chávez, A., Hernández, C.,(1999). *Alternative treatment for wastewater destined for agricultural use*. *Water Science and Technology*, **40**, 355-362.
16. Jiménez, B., (2001). *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. Editorial Limusa. México, D. F.
17. Jiménez, B., Chávez, A., Maya, A., Jardines, L., (2001). *Removal of microorganisms in different stages of wastewater treatment for Mexico City*. *Water Science and Technology*, **43 (10)**, 155-162.
18. Katayon, S., Megat Mohd Noor, M. J., Ahmad, J., Abdul Ghani, L. A., Nagaoka, H., Aya, H. (2004). *Effects of mixed liquor suspended solid concentrations on membrane bioreactor efficiency for treatment of food industry wastewater*. *Desalination*, **167**, 153-158.
19. Lesjean, B., Gnirss, R., Adam, Ch., (2002). Process configurations adapted to membrane bioreactors for enhanced biological phosphorous and nitrogen removal. *Desalination*, **149**, 217-224.
20. Lenntech (2004). *Agua residual y purificación del aire*. Delf, Holanda. ([www.lenntech.com](http://www.lenntech.com))
21. Lin, et al, (1999). *Operating characteristics and kinetic studies of surfactant wastewater treatment by Fenton oxidation*. *Water Research*, **33**, 1735-1741.
22. Liu, Y., (2003). *Chemically reduced excess sludge production in the activated sludge process*. *Chemosphere*, **50**, 1-7.
23. Logea, F. J., Emerickb, R. W., Ginnc, T. R., Darbyc, J. L. (2002). *Association of coliform bacteria with wastewater particles: impact of operational parameters of the activated sludge process*. *Water Research*, **36**, 41-48.



24. Long, David A., (1991). *Operation of municipal wastewater treatment plants*. Vol. II. Imperial printing Co. Mich., U. S.
25. Martínez, C. y Vite, C. B., (2004). "Efecto del reactivo de fenton sobre compuestos tensoactivos presentes en las aguas residuales". Reporte de Investigación, Ingeniería de proyectos. Facultad de Química, UNAM.
26. Metcalf y Eddy, (1996). *Ingeniería de aguas residuales : tratamiento, vertido y reutilización*. Tercera edición. McGraw-Hill. México.
27. Millán, S., (2005). *Determinación de la eficiencia de oxidación de tensoactivos aniónicos en agua residual utilizando el reactivo de Fenton*. Tesis de maestría. Facultad de Química, UNAM.
28. Moreno, O., Del Rífo, R., Leiva, M., Aguilar, E., Salazar, D., González, A., Fragoso, A., Martínez, M. P., (1998). *Evaluación de tecnologías en la industria de refinación del petróleo*. Instituto Mexicano del Petróleo. Subdirección de transformación industrial. PEMEX-Refinación. Subdirección de producción.
29. Ognier , S. , Wisniewski , C., Grasmick , A.(2002). *Characterization and modelling of fouling in membrane bioreactors*. Desalination, **146**, 141-147.
30. Ramalho R. S., (1982). *Tratamiento de aguas residuales*. Reverté. España.
31. Ramírez Zamora, R. M., Orta de Velásquez, M. T., Durán Moreno, A., Malpica de la Torre, J.(2002). *Characterization and conditioning of Fenton sludges issued from wastewater treatment*. Water Science and Technology, **46 (10)**, 43-49.
32. Rigopoulos, S., Linke, P., (2002). *Systematic development of optimal activated sludge process designs*. Computers and Chemical Engineering, **26**, 585-597.
33. Rosenberger, S., (2001). *Comparison of different membrane bioreactors for wastewater treatment*. Membrane Research, TU Berlín.
34. Ruiz *et al*, (2004). *Aguas residuales y plantas de tratamiento*. Granada, España. ([www.redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/proyectos/aguas\\_oto04/etapa2/aguasres2.htm](http://www.redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/proyectos/aguas_oto04/etapa2/aguasres2.htm))
35. Shao, Y.J., Liu, A., Wada, F., Crosse, J., Jenkins, D., (1996). *Advances primary treatment: an alternative to biological secondary treatment. The city of Los Angeles hymperton treatment plant experience*. Water Science and Technology, **34**, 223-233.



36. Steinmetz, H., Wiese, J., and Schmitt, T.G., (2002). *Efficiency of SBR technology in municipal wastewater treatment plants*. Water Science and Technology, **46** (4-5), 293-299.
37. Surampalli, R.Y., Tyagi, R.D., Scheible, O.K., Heidman, J. A., (1997). *Nitrification, denitrification and phosphorus removal in sequential batch reactors*. Bioresource technology, **61**, 151-157.
38. Tchobanoglous, G., F.L. Burton y H.D. Stensel, (2003). *Wastewater engineering treatment and reuse*. Cuarta edición. McGraw-Hill Inc. Boston.
39. US EPA 832-F-99-073 (1999). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: reactores secuenciales por tandas*. Office of water, Washington D.C. ([www.epa.gov/docs/owmitnet/mtb/cs\\_99\\_073.pdf](http://www.epa.gov/docs/owmitnet/mtb/cs_99_073.pdf)).
40. US EPA 832-F-00-067 (2002). *Folleto informativo del manejo de biosólidos y residuos: Control de olores en el manejo de biosólidos*. Office of water, Washington D.C. ([www.epa.gov/owm/mtb/cs-00-067.pdf](http://www.epa.gov/owm/mtb/cs-00-067.pdf)).

<http://www.dynatecsystems.com/news/pr/norit.html>

<http://www.environmental-center.com/publications/iwa/1843390116.htm>

<http://www.envicare.com>

<http://www.abjwastewater.com/pdf/johnsonv.pdf>

<http://www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=580>

[http://www.pwgsc.gc.ca/rps/inac/content/docs\\_technical\\_wastewater\\_part5-e.html](http://www.pwgsc.gc.ca/rps/inac/content/docs_technical_wastewater_part5-e.html)

<http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/contenido/capitulo19.html>