



**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“DISEÑO DE UN BIORREACTOR DE MEMBRANAS PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA CONSUMO INDIRECTO”**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**YERETH GARCÍA GARCÍA**

**ASESOR**

**DR. ROBERTO GUERRA GONZALES**

**COASESOR**

**ING. VICTOR JESUS SAGRERO MORA**

**Morelia Michoacán noviembre de 2022**

---

# ÍNDICE

## Contenido

|  |    |
|--|----|
| <b>FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA</b>          | 1  |
| <b>ÍNDICE</b>                                  | 2  |
| <b>RESUMEN</b>                                 | 4  |
| <b>ABSTRACT</b>                                | 5  |
| <b>GLOSARIO</b>                                | 6  |
| <b>NOMENCLATURA</b>                            | 7  |
| <b>AGRADECIMIENTOS</b>                         | 8  |
| <b><i>CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN</i></b>         | 10 |
| <b>1.1 Generalidades</b>                       | 10 |
| <b>1.2 Objetivo General</b>                    | 12 |
| <b>1.3 Objetivos Particulares</b>              | 12 |
| <b>1.4 Justificación</b>                       | 12 |
| <b>1.5 Hipótesis</b>                           | 13 |
| <b><i>CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO</i></b>        | 13 |
| <b>2.1 Contaminacion del Agua</b>              | 13 |
| <b>2.1 Pretratamiento</b>                      | 16 |
| <b>2.1.1 Tratamiento Primario</b>              | 16 |
| <b>2.1.2 Tratamiento Secundario</b>            | 17 |
| <b>2.1.3 Tratamiento Terciario</b>             | 19 |
| <b>2.2 Caracterización de Aguas Residuales</b> | 21 |
| <b>2.2.1 Curva del Crecimiento Bacteriano</b>  | 22 |

---

|  |    |
|--|----|
| <b>2.2.2 Parámetros de Operación de los Reactores Biológicos</b> | 24 |
| <b>2.4 Procesos Biológicos de Tipo Anaerobio</b>                 | 30 |
| <b>2.4.2 Biorreactor de Membranas</b>                            | 35 |
| <b>2.5 Sistemas de Tratamiento Anóxicos</b>                      | 38 |
| <b>2.6 Procesos Biológicos de Tipo Aerobio</b>                   | 38 |
| <b>2.7 Procesos biológicos de cultivo en suspensión</b>          | 39 |
| <b>2.8 Biorreactores de Membrana</b>                             | 41 |
| <b>2.9 Normas Oficiales Mexicanas SEMARNAT</b>                   | 41 |
| <b>2.9.1 NOM-001-SEMARNAT-1996</b>                               | 41 |
| <b>2.9.2 NOM-003-SEMARNAT-1997</b>                               | 42 |
| <b><i>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA</i></b>                            | 43 |
| <b><i>CAPITULO 4. RESULTADOS</i></b>                             | 49 |
| <b>4.1 Análisis y Discusión de resultados</b>                    | 49 |
| <b>4.2 Diseño del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales</b> | 50 |
| <b>CAPITULO 5. CONCLUSIONES</b>                                  | 60 |
| <b>OBSERVACIONES:</b>  | 60 |
| <b>REFERENCIAS</b>   | 61 |

---

## RESUMEN

### **“DISEÑO DE UN BIORREACTOR DE MEMBRANAS PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA CONSUMO INDIRECTO”**

Por

Yereth García García

Agosto 2022

Dirigida por: Roberto Guerra Gonzales

Este proyecto de tesis presenta un enfoque de que el único componente de la biosfera capaz de regular las condiciones del ambiente final ha sido el hombre, es decir, el hombre desde el comienzo DE formación de las sociedades industriales, urbanas y agrícolas.

Nos centraremos únicamente en el hecho de que el desarrollo humano no ha logrado encontrar una solución adecuada la contaminación del agua. La mayor parte de la contaminación proviene de los usos urbanos, industriales y agrícolas, sin ignorar los efectos de la contaminación natural del agua, que se produce principalmente por el daño a las aguas subterráneas cerca de la costa, los océanos debido a la intrusión de agua salada, a menudo debido a las actividades desproporcionadas de robo de agua por parte de los humanos.

Señalemos a la vez algo muy común y contrario a su propio contenido: "El grado de contaminación de la naturaleza aumenta con el nivel de desarrollo de la humanidad. Y en la contaminación que amenaza cada vez más a la tierra, la contaminación del agua tiene un papel muy importante". Debido a que es un medio indispensable para la vida.

Palabras clave: Agua, Contaminación, usos urbanos, usos agrícolas

---

## **ABSTRACT**

**“DESIGN OF A MEMBRANE BIOREACTOR FOR WASTEWATER TREATMENT  
FOR INDIRECT CONSUMPTION”**

By

Yereth García García

August 2022

Supervised by: Dr. Roberto Guerra Gonzales

This thesis project presents an approach that focuses on the fact that the only component of the biosphere capable of regulating the conditions of the final environment has been man, that is, man from the beginning of industrial, urban and agricultural societies.

We will focus only on the truth that human development has failed to find an adequate solution to avoid water pollution. Most pollution comes from urban, industrial and agricultural uses, without ignoring the effects of natural water pollution, which is mainly caused by damage to groundwater near the coast, the oceans due to the intrusion of saltwater, often caused by disproportionate water-stealing activities by humans.

Let us point out at the same time. something very common and contrary to its own content: "The degree of pollution of nature increases with the level of mankind development. Along with the environmental pollution pollution that increasingly threatens the earth, the Water is a key factor." Because water is essential for life..

Keywords: Water, Pollution, urban uses, agricultural uses

---

## GLOSARIO

**Carga Orgánica:** La carga orgánica es el contenido de compuestos de carbono en un efluente, cualquiera sea su origen. Dichos compuestos de carbono son estructuras químicas (moléculas) donde el carbono está enlazado a hidrógeno y otros elementos como azufre, oxígeno, nitrógeno, fósforo y cloro, entre otros.

**Demanda Química de Oxígeno:** Es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida. Se utiliza para medir el grado de contaminación. Aunque este método pretende medir principalmente la concentración de materia orgánica, sufre interferencias por la presencia de sustancias inorgánicas susceptibles de ser oxidadas (sulfuros, sulfitos, yoduros...) ,que también se refleja en el valor del parámetro.

**Demanda Bioquímica de Oxígeno:** Es un parámetro que mide la cantidad de dióxigeno consumido al degradar la materia orgánica de una muestra líquida.

Es la materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión. Se utiliza para medir propiamente el grado de contaminación; normalmente se mide transcurridos cinco días de reacción (*DBO<sub>5</sub>*).

**Licor Mezclado o Mixto:** Homogeneizado del agua residual con los flóculos bacterianos para el tratamiento biológico.

**Lodo Activado:** Se le conoce como lodo activado al agrupamiento de bacterias depositadas en suspensión (y posteriormente en el fondo) de un tratamiento biológico de aguas residuales.

## NOMENCLATURA

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| DQO mg/L                           | Demanda Química de Oxígeno   |
| SST mg/L                           | Sólidos Suspendidos Totales  |
| SSV mg/L                           | Sólidos Suspendidos Volátiles  |
| $N_T$ mg/L                         | Nitrógeno Total  |
| DBO mg/L                           | Demanda Bioquímica de Oxígeno  |
| RAS                                | Recirculación de Lodos Activados                                     |
| WAS                                | Purga de Lodos Activados   |
| MLVSS MG/L                         | Sólidos Suspendidos Volátiles en Suspensión en el Licor de la Mezcla |
| COV mg/L*d                         | Carga Orgánica Volumétrica   |
| TRH d                              | Tiempo de Retención Hidráulico                                       |
| $Q$ m <sup>3</sup> /d              | Caudal   |
| RTM m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> | Relación Tanque - Membrana   |
| MLSS mg/L                          | Sólidos Suspendidos en el Licor de Mezcla                            |
| $P_{X,TSS}$ g/d                    | Producción de Lodos (SST)  |
| SRT d                              | Tiempo de Retención de Sólidos                                       |
| sDBO mg/L                          | Demanda Bioquímica de Oxígeno Soluble                                |
| sDQO mg/L                          | Demanda Química de Oxígeno Soluble                                   |
| bDQO mg/L                          | Demanda Química de Oxígeno Biodegradable                             |
| nbDQO mg/L                         | Demanda Química de Oxígeno no Biodegradable                          |
| nbsDQO mg/L                        | Demanda Química de Oxígeno Soluble no Biodegradable                  |
| nbpDQO mg/L                        | Demanda Química de Oxígeno Particulada no Biodegradable              |
| nbVSS mg/L                         | Sólidos Suspendidos Volátiles no Biodegradables                      |
| $P_{bio}$ g/d                      | Producción de Biomasa Heterótrofa (en SSV)                           |
| NOx mg/L                           | Nitrógeno Amoniacal  |
| $P_{x,b}$ g/d                      | Producción de Lodos (Total)  |
| $X_b$                              | Relación de producción de Lodos - Biomasa                            |
| $X_{pre,b}$ mg/L                   | Concentración de biomasa activa en tanque de preaireación            |
| F/M g/g*d                          | Tasa de Alimentación de Masa   |
| SDNR (g/g*d)                       | Tasa de Denitrificación Total  |

---

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecido con la vida misma por permitirme llegar a este punto tan importante en la formación profesional de mi persona viendo los frutos de estos arduos años de trabajo, dedicación y tiempo.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en especial a la Facultad de Ingeniería Química por permitirme conocerme a mí como persona y conocer a grandes personas, estudiantes, amigos, compañeros y maestros que en conjunto hacen sentir el vivo espíritu nicolaíta

***A Mi Padre***

***Raúl García Pérez***

Te agradezco a ti ejemplo de profesionalidad, amor y cariño, te agradezco por procurar mi bien desde niño, esta es mi manera más honesta para honrar tu memoria con este detalle.

Esta es mi manera de dejar un registro de tu nombre y el esfuerzo, tiempo y amor que infundiste en mi persona.

---

***A Mis Amigos:***

***Alfonso Lemus, Víctor Osvaldo, José Domingo, Refugio Mora, Said Ulaje, Juan Manuel, Rubí Piña, Mario Edwin etc.***

Ustedes son y serán siempre una pieza clave a lo largo de mi recorrido dentro de esta carrera, son quienes me hicieron ver otras perspectivas a mis problemas no solo académicos, también a mis problemas personales. Les agradezco por haber despertado en mis aptitudes que no sabía que podía desarrollar con su paciencia y atención.

-Ustedes son parte de este logro-

¡Gracias!

***Yereth García García***

## ***CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN***

El agua es un recurso indispensable para la conservación de todo tipo de vida, recurso que día con día se va agotando por el aumento de la demanda de agua potable para el desarrollo de las actividades humanas y el vertido de las aguas residuales a los distintos cuerpos receptores sin un tipo de tratamiento adecuado, aumenta los niveles de contaminación de las aguas superficiales. La problemática ambiental generada por los vertidos de aguas residuales ha dado lugar a la creación de nuevos reglamentos que permiten regular la cantidad de contaminantes vertidos, lo cual ha hecho necesario la implementación de nuevas tecnologías de tratamientos de aguas residuales que permitan aumentar el rendimiento de depuración y mejorar la calidad del efluente. El tratamiento de aguas residuales mediante Biorreactores de Membranas se presenta como una alternativa innovadora a la depuración y regeneración del agua ante los tratamientos biológicos al proporcionar un efluente con calidad de tratamiento terciario y una reducción considerable en la producción de fangos. Por tal motivo en el siguiente trabajo se presenta una descripción de la situación ambiental en el parque Benito Juárez de Morelia, Michoacán, México, así como el diseño de una planta piloto aplicando la tecnología de Biorreactor de Membranas y evaluando la calidad del agua obtenida para distribuirla a los usos que le sean pertinentes y de esta manera promover un adecuado manejo de las aguas residuales que permitan optimizar el uso de un líquido tan vital como lo es el agua.

### **1.1 Generalidades**

Las características que determinan la calidad natural del agua se refieren a sus aspectos físicos, químicos, bacteriológicos, radiactivos ... Según estas determinaciones, la calidad del agua de un acuífero puede permitir una aplicación concreta, a la vez que está degradada para otras prestaciones. Por ejemplo, el agua de un embalse puede ser útil para producir energía eléctrica o para el riego, y sin embargo estar contaminada para el abastecimiento doméstico. Así pues, cada una de las aplicaciones útiles del agua requiere un grado de calidad natural, cuyos límites los determinan las normas legales de los distintos países y organismos internacionales.

Hay 2 tipos de contaminación: la puntual y la difusa o dispersa. Las primordiales fuentes de contaminación del agua en México son:

- Prácticas agrícolas. Las aguas de retorno agrícola son una fuente de contaminación fundamental cuyo efecto se afirma en el elevado porcentaje de cuerpos de agua que se hallan en condiciones de eutrofización.
- Urbanización. Está relacionada con la cobertura de los servicios de agua potable y alcantarillado, aumenta en los gigantes asentamientos urbanos.

Descargas generadas por las ocupaciones de sustracción y transformación de recursos naturales utilizados como bienes de consumo y satisfactores para la población. El volumen de agua utilizada en la industria es de  $6 \text{ km}^3$  /año, del cual se descargan alrededor de  $5.36 \text{ km}^3$  /año como aguas residuales, o sea bastante más de 6 millones de toneladas al año de carga orgánica expresada como demanda bioquímica de oxígeno (DBO), de las cuales son tratadas solamente el 15%.

Hay muchos más de 850 sitios asociados a cuerpos de agua que podrían destinarse al establecimiento de sitios recreativos.

### **Contaminación del agua freática o subterránea.**

Las primordiales fuentes de contaminación son: lixiviados de desperdicios rígidos, descargas de agua residual no incorporadas al drenaje municipal y ruptura de minerales y formaciones rocosas.

Además, se muestra un problema general de contaminación difusa en los acuíferos que subyacen en las regiones agrícolas. En los casos del arsénico y el fluoruro, la mayoría de los inconvenientes a la salud se deben a la existencia natural de los contaminantes en el suelo. No obstante, una porción cada vez más alta de inconvenientes por deficiencias en la calidad del agua se debería a la contaminación generada por los seres vivos y a la degradación generalizada ambiental.

Antes de considerar la incidencia de un desarrollo no integral en la contaminación de las aguas, fijémonos en la definición de contaminación del agua: es la alteración de su calidad natural por la acción humana, que la hace total o parcialmente inadecuada para la aplicación útil a que se destina.

## 1.2 Objetivo General

Estudiar la viabilidad técnica para la aplicación de un Biorreactor de Membrana en el tratamiento de aguas residuales del Parque Benito Juárez de la ciudad de Morelia, que permita obtener un efluente reutilizable.

## 1.3 Objetivos Particulares

- Realizar un balance de consumo del agua del parque, la producción y características de los residuos líquidos.
- Conocer las variables y parámetros físicos, químicos y microbiológicos operacionales necesarios para la realización del diseño de un biorreactor de membrana.
- Diseñar una planta piloto de tratamiento de aguas residuales aplicando la tecnología de biorreactor de membrana.
- Evaluar las características de las aguas regeneradas para diseñar un sistema de reutilización de las mismas que permita aumentar el ciclo de vida del agua y de esta manera reducir el consumo de agua

## 1.4 Justificación

Desde que el agua se empezó a utilizar como medio de transporte de los residuos industriales y domésticos, los ríos han servido como cuerpos receptores en donde se drenan las aguas procedentes de las ciudades y municipios, los cuales a su vez transmiten la contaminación aguas abajo afectando otras localidades y finalmente descargan en los litorales marinos.

Con el propósito de enfrentar esta problemática en cuanto a la disposición de aguas residuales, cuyas actividades productivas generan aguas residuales de alta carga orgánica (mayor a 500 mg/L de DBO), y que no se encuentran dentro de la planeación de sistemas de drenaje, se exploran alternativas que permitan dar solución a estas situaciones.

Una gran ventaja de la tecnología de los biorreactores de membrana reside en la posibilidad de reutilizar el efluente obtenido. La utilización de un módulo de ultrafiltración con un rango de tamaño de poro

comprendido entre 0.005 y 0.100  $\mu\text{m}$  permite mejorar la calidad del efluente evitando la presencia de sólidos, materia coloidal, bacterias y algunos virus. Por lo tanto, el efluente obtenido, según el uso final que se le quiera dar, puede ser reutilizado directamente o utilizado como alimentación a un proceso de electrodiálisis reversible u osmosis inversa.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Las descargas con alta materia orgánica dominan el panorama de la contaminación de las aguas superficiales y constituyen la principal causa de contaminación de sus recursos hídricos superficiales. Sus efectos no solo se relacionan con los daños en la calidad del agua, sino que a su vez afectan en distinta proporción todos los usos legítimos del agua representando una seria amenaza para la salud humana. Para obtener una alta calidad en el agua tratada es necesario implementar nuevas tecnologías en las plantas de tratamiento, lo que se ha convertido en un gran reto.

### **1.5 Hipótesis**

Al no existir problemas de sedimentabilidad de la biomasa, en los MBR se puede llevar a cabo el proceso de eliminación de nutrientes (especialmente nitrógeno) por vía biológica en una sola etapa, de forma que incrementando el tiempo de residencia celular en el biorreactor se consigue eliminar la materia orgánica biodegradable. De esta forma, el permeado (agua tratada) estará libre de materia orgánica y de nitrógeno, permitiendo que esta agua pueda ser reutilizada,

## ***CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO***

### **2.1 Contaminación del Agua**

El único componente de la biosfera capaz de regular las condiciones del ambiente final son los humanos, es decir, los humanos desde la formación de las sociedades industriales, urbanas y agrarias.

Nos centraremos únicamente en la explosión a la que el desarrollo humano no ha sabido encontrar una solución adecuada, la contaminación del agua. La mayor parte de la contaminación proviene de los usos

urbanos, industriales y agrícolas, sin ignorar los efectos de la contaminación natural del agua, que se produce principalmente por el daño a las aguas subterráneas cerca de la costa, los océanos debido a la intrusión de agua salada, a menudo debido a cantidades desproporcionadas de agua robada.

Señalemos al mismo tiempo algo muy común y contrario a su propio contenido: “El grado de contaminación de la naturaleza aumenta con el nivel de desarrollo humano. Y en la contaminación que amenaza cada vez más a la tierra, la contaminación del agua tiene un papel muy importante. " Porque es un sustento de vida.

En su forma más simple, una planta de tratamiento de aguas residuales evacúa sólidos, reduce la materia orgánica y los contaminantes y además de restaurar la presencia de oxígeno. Los sólidos incluyen todo, desde trapos y maderas, a arena y partículas pequeñas que se encuentran en las aguas residuales. La reducción de la materia orgánica y de los contaminantes es llevada a cabo usando bacterias útiles y otros microorganismos que se usan para consumir la materia orgánica en el agua residual. Las bacterias y los microorganismos son luego separados del agua. La restauración del oxígeno es importante ya que el agua debe tener suficiente oxígeno para sostener la vida.

El 40.4 % de la población rural, 10.43 millones de habitantes de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2010 del INEGI, disponían de fosas sépticas para descargar y tratar sus aguas residuales. El saneamiento para la población rural considera la construcción de fosas sépticas secas o húmedas unifamiliares y/o comunales, las que en muchos casos son simples pozos llamados pozos negros y en otros son fosas sépticas formales, construidas por la población; también incluye letrinas ecológicas construidas o suministradas a través de los programas de apoyo federales, estatales y/o municipales e internacionales, programas que han sido desarrollados en forma extensiva, pero aún insuficiente dada la magnitud del número de localidades. En el caso de las fosas húmedas, con frecuencia el efluente de éstas - unidades sin tratamiento posterior, escurre hacia pequeñas parcelas o zonas de infiltración natural y, en muchos casos, termina por descargar en arroyos u otros cuerpos receptores naturales donde con frecuencia da origen a diversos problemas y malos olores, situación que requiere ser solventada dentro de los planes de saneamiento.

La población rural que cuenta con red de alcantarillado requiere que sus aguas se colecten y conduzcan a sistemas de tratamiento completos en comparación con el que representan las fosas sépticas. En pequeñas localidades que cuentan con red de alcantarillado la disposición que más se practica es:

- La descarga de las aguas residuales a hondonadas o accidentes topográficos naturales donde el agua se infiltra, evapora y/o escurre causando malos olores y la presencia de vectores dañinos.

- La descarga a diversos a cuerpos de agua naturales, donde se produce contaminación además de limitar los usos del agua y ser potencialmente una fuente de enfermedades gastrointestinales. En México, a través del Programa para la Sostenibilidad de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento de Comunidades Rurales (PROSSAPYS), hasta el año 2010, se habían construido 291 pequeñas plantas de tratamiento de aguas residuales, con una capacidad total instalada de 996.2 L/s, que tratan un caudal de 591 L/s de aguas residuales. La capacidad individual de tratamiento de estas plantas varía de 0.2 a 11 L/s.

Por lo anterior, es necesario contar con más alternativas de procesos de tratamiento de bajo costo de inversión, operación y mantenimiento, lo que permitirá ampliar la cobertura del servicio de tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades que cuentan con red de alcantarillado, situación en la cual es conveniente aprovechar las experiencias tecnológicas de otros países más avanzados, como Japón.

Estos procesos son alternativos para mejorar la calidad de las aguas residuales de pequeñas localidades, por lo cual es necesario estudiar a mayor detalle estas tecnologías para su implementación. Es por ello que la Gerencia de Potabilización y Tratamiento de la Conagua y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) conjuntaron esfuerzos para desarrollar el presente manual, así como para elaborar el proyecto para construir, al menos, una planta piloto a fin de explorar y definir el potencial de aplicación de la tecnología de tratamiento y coadyuvar en el tratamiento de las aguas residuales de comunidades rurales.

Tabla1. Descripción de etapas de tratamiento

| Nivel de tratamiento     | ÍTEM                     |  |  |
|--------------------------|--------------------------|--|--|
|                          | Mecanismos predominantes | Contaminantes removidos  | Eficiencias de reducción   |
| <b>Preliminar</b>        | Físico                   | Sólidos gruesos (basuras, arenas)<br>Grasas<br>Acondicionamiento químico (pH)  | SS: <10 %<br>DBO: <10 %<br>Coliformes: ≈ 0 %<br>Nutrientes: ≈ 0 %                  |
| <b>Primario</b>          | Físico                   | Sólidos suspendidos sedimentables<br>Materia orgánica suspendida (parcialmente)  | SS: 40-50 %<br>DBO: 25-35 %<br>Coliformes: 30-40 %<br>Nutrientes: < 20 %           |
| <b>Primario avanzado</b> | Físico y químico         | Sólidos suspendidos sedimentables y no sedimentables<br>Materia orgánica suspendida (parcialmente)<br>Fósforo                                | SS: 70-85 %<br>DBO: 45-55 %<br>Coliformes: 60-90 %<br>Nutrientes: 20 %N; 50-95 % P |
| <b>Secundario</b>        | Biológico o químico      | Sólidos no sedimentables<br>Materia orgánica suspendida fina/soluble (parcialmente)<br>Nutrientes (parcialmente)<br>Patógenos (parcialmente) | SS: 60-99 %<br>DBO: 60-99 %<br>Coliformes: 60-99 %<br>Nutrientes: 10-50 %          |
| <b>Terciario</b>         | Biológico o químico      | Contaminantes específicos<br>Materia orgánica fina y soluble (pulimento)<br>Nutrientes<br>Patógenos (principalmente)                         | SS: > 99 %<br>DBO: > 99 %<br>Coliformes: > 99,9 %<br>Nutrientes: > 90 %            |

## 2.1 Pretratamiento

Por medio del Tratamiento de Aguas Residuales es posible eliminar los contaminantes presentes en el agua a nivel físico, biológico y químico.

Las aguas tratadas pueden ser utilizadas de distintas maneras, por lo que el proceso de tratamiento que se les da está relacionado con el uso que éstas tendrán como el riego, agricultura, industria, entre otros.

En el pretratamiento se llevan a cabo operaciones físicas y mecánicas, con el objetivo de separar de las aguas residuales la mayor cantidad de materias que podrían causar problemas en los tratamientos que se desarrollan posteriormente. Este tipo de materias pueden incluir grasas, aceites, ramas, basura, entre otros. (Incluye equipos tales como rejas, tamices, desarenadores y desengrasadores)

### 2.1.1 Tratamiento Primario

El tratamiento primario es de carácter físico-químico, con éste se busca reducir la materia suspendida, ya sea por medio de precipitación, sedimentación, o algunos tipos de oxidación química. Se eliminan los sólidos en suspensión presentes en el agua residual.

Los principales procesos físico-químicos que pueden ser incluidos en el tratamiento primario son los siguientes

- Sedimentación Primaria
- Flotación
- Coagulación – floculación y filtración

Éste tiene altos costos, por lo que no se utiliza en todos los procesos.

## 2.1.2 Tratamiento Secundario

El tratamiento secundario se emplea para eliminar cualquier contaminación orgánica disuelta, por lo que la manera más eficiente de llevarlo a cabo es por medio de procesos biológicos. Este proceso se puede llevar a cabo, mediante distintos sistemas, de manera aerobia o anaerobia.

Son métodos de tratamiento de agua residuales en los cuales la remoción de contaminantes se realiza a través de la actividad biológica.

Se utiliza para remover sustancias orgánicas, coloidales o disueltas.

La materia orgánica degradable se transforma en material celular (nuevas células o gases).

Los procesos biológicos se usan también para remover nitrógeno y fósforo.

Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente “RAFA o UASB”

La digestión anaerobia es un proceso microbiológico complejo que se realiza en ausencia de oxígeno, donde la materia orgánica se transforma a “biomasa” y compuestos orgánicos, la mayoría de ellos volátiles.

El agua residual entra al RAFA por el fondo, y fluye hacia arriba. Los microorganismos que forman la capa de lodo, depuran el agua al ir atravesándola en su flujo ascendente

Los lodos son depositados en el fondo del reactor y el agua y el gas son separados en la superficie

El efluente clarificado es extraído de la parte superior del tanque mediante una canaleta por encima de las paredes inclinadas del reactor.

El gas metano generado puede almacenarse para ser utilizado en algún proceso de calentamiento o ser enviado a un quemador de gas para convertirlo en CO<sub>2</sub>.

EL PROCESO ANAEROBIO ES ALTERADO POR LA PRESENCIA DE:

- METALES PESADOS
- ALCALINIDAD ALTA
- SULFATOS
- SULFUROS
- CLOROFORMO
- CIANUROS

- FENOLES
- CLORUROS (ALTOS)
- NITRATOS (DQO/N > 70)
- VARIACIONES DE pH y temperatura

Cantidades excesivas de estos compuestos inhiben la actividad de las bacterias encargadas de degradar la materia orgánica.

Después del sistema anaerobio es necesario realizar un pulimento para eficientar el proceso y lograr los parámetros de salida requeridos.

Generalmente se realiza mediante un FILTRO PERCOLADOR, que es un filtro biológico de lecho fijo que opera bajo condiciones (principalmente) aeróbicas. Se "deja caer" o rocía agua de desecho decantada sobre el filtro. Al migrar el agua por los poros del filtro, la materia orgánica se degrada por la biomasa que cubre el material del filtro.

### **Lodos Activados**

Es un proceso con alta eficiencia de remoción que se basa en el suministro controlado de aire para transformar los contaminantes presentes en el agua en microorganismos, generando a la vez, energía para su metabolismo, formando "flóculos" que se mantienen en suspensión (lodos activados) degradando de esta forma la materia orgánica.

El lodo activado se desarrolla inicialmente por una aireación prolongada bajo ciertas condiciones que favorecen el crecimiento de organismos que tienen la capacidad de oxidar la materia orgánica.

En este proceso el paso más importante es la aireación, se logra por difusión de aire, que se inyecta por medio de sopladores y a través de tuberías y difusores de aire bajo la superficie del licor mezclado, o por agitación mecánica con ruedas de paletas, o hélices, que, provocando turbulencia en la mezcla de aguas negras y lodos, expondrán el líquido al contacto con la atmosfera y absorberán el oxígeno.

- Este mezclado se envía a un sedimentador secundario.
- Clarificación secundaria sedimentador.
- Los flóculos en suspensión, son separados de la corriente de agua tratada por sedimentación.
- El agua clarificada es enviada a desinfección.

- Clarificador secundario “sedimentador lamelar”.
- Una parte de los lodos decantados son recirculados y la otra son retirados para estabilizarlos.

### **2.1.3 Tratamiento Terciario**

Finalmente, se encuentra el tratamiento terciario, que combina procesos de carácter físico-químico y biológico, mejorando así el producto final. Éste puede lograr que el agua tratada pueda ser apta para el abastecimiento agrícola, industrial o potable.

Tratamiento terciario o avanzado que está dirigido a la reducción final de la DBO, metales pesados y/o contaminantes químicos específicos y la eliminación de patógenos y parásitos.

En general los procesos y operaciones para el tratamiento de aguas residuales o arreglos del tren de tratamiento, debe buscar principalmente lo siguiente:

- Que puedan operarse eficientemente con mano de obra local.
- Evitar en lo posible el uso del equipo electromecánico.
- Ser económico y socialmente factible.

Obtener un tren de tratamiento con el menor grado de complejidad, máxima economía y que cumpla con los requerimientos de calidad exigidos por la normatividad en la materia.

Tabla 2. Ventajas y Desventajas de Lodos Activados

**LODOS ACTIVADOS**

| <b>VENTAJAS</b>  | <b>DESVENTAJAS</b>   |
|--|--|
| Remueve más del 80 % de DBO <sub>5</sub> y sólidos totales.          | Mayor costos de operación y mantenimiento.                         |
| La buena eficiencia depende de un buen diseño y una buena operación. | Mayor consumo de energía, porque necesita aireación constante.     |
| Resiste variaciones de carga orgánica hasta cierto límite.           | Requiere menor área que un filtro rociador.                        |
|  | Se necesita personal calificado para su operación y mantenimiento. |

Tabla 3. Comparación Lodos Activados vs RAFA(UAB)

**VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PROCESOS DE  
LODOS ACTIVADOS vs RAFA (UAB)**

| <b>CONCEPTO</b>                              | <b>LODOS ACTIVADOS</b>  | <b>UASB</b>   |
|--|---|---|
| EFICIENCIA DE REMOCIÓN (%)                   | 80-95%  | 65-95%  |
| ESTABILIDAD, NECESIDADES DE OPERACIÓN        | Se pueden lograr efluentes con 20/20 mg/lit   | Esta remoción se logra sólo si es operada correctamente.  |
|  | Relativa facilidad de estabilización  | Largos periodos de arranque.  |
|  | Mayor estabilidad y control de operación ante cambios de concentración o de temperatura | Mayor sensibilidad a cambios ambientales y concentración de parámetros especialmente pH y Temperatura     |
|  | Mayor consumo de Energía  | Si no se utiliza el biogás se debe quemar con la subsecuente generación de CO <sub>2</sub> a la atmósfera |
|  | No genera olores  | Puede generar H <sub>2</sub> S (venenoso) dando problemas de olores e inhibición del proceso.             |
|  |   | Si no se opera en forma adecuada el UASB puede generar malos olores                                       |
|  | Mayor manejo de lodos   | Menor generación de lodos   |
|  | Recomendado para grandes flujos   | Baja eficiencia en flujos mayores por lo que se recomienda para flujos pequeños                           |
| Puede utilizarse para altas cargas orgánicas | Dificultad en el manejo de cargas orgánicas elevadas                                    |   |

---

## 2.2 Caracterización de Aguas Residuales

Para conocer el tipo de contaminación es necesario llevar a cabo una caracterización del agua residual, la cual proporciona una amplia variedad de información sobre el tipo y la concentración de los contaminantes.

Algunos de los parámetros físicos que deberán ser analizados son:

- Ph
- Temperatura
- conductividad

Sin embargo, los que darán información sobre el contenido del orgánico contaminante serán:

- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Es la cantidad de oxígeno consumida o necesaria para la descomposición microbiológica (oxidación) de la materia orgánica en el agua, se define como la cantidad total de oxígeno requerido por los microorganismos para oxidar la materia orgánica biodegradable.

- Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Mide toda la materia orgánica del agua (la biodegradable y la no biodegradable) susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida:

- Nutrientes (nitrógeno y fósforo)
- Sólidos en Suspensión
- Sólidos Sedimentables
- Además de los relacionados con el tipo de actividad que genera el efluente (metales, tensioactivos, sulfatos, cianuros, etc.)

Para cumplir este objetivo, la selección debe considerar los siguientes criterios:

- Tipo del agua residual a tratar.
- Tolerancia a variaciones de caudal.
- Eficiencia de tratamiento requerida.

- Generación y manejo de residuos.
- Complejidad del proceso en operación.
- Flexibilidad: Que puedan manejarse variaciones hidráulicas por necesidades de retirar algún elemento para dar mantenimiento.
- Confiabilidad que garantice durante su vida útil la calidad requerida en el efluente.

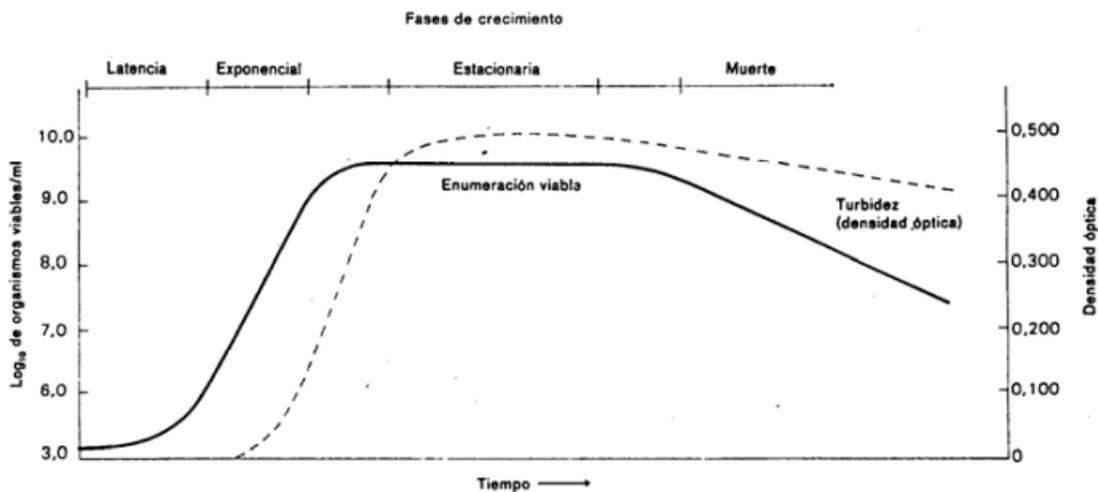
#### REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA:

- Reactivos.
- Energía eléctrica.
- Mano de obra (número y grado de calificación).
- Área.

### 2.2.1 CURVA DEL CRECIMIENTO BACTERIANO

En la figura se ilustra una curva de crecimiento de una población bacteriana. Esta curva se divide en cuatro fases denominadas fase de latencia, fase exponencial o fase logarítmica, fase estacionaria y fase de muerte.

Figura 1. Curva de fases de crecimiento bacteriano



---

## **Fase de latencia**

Cuando una población bacteriana es inoculada en medio fresco, el crecimiento usualmente no comienza de inmediato sino después de un tiempo llamado de latencia, que puede ser corto o largo dependiendo de las condiciones.

La fase de latencia representa un periodo de transición para los microorganismos cuando son transferidos a una nueva condición. En esta fase se producen las enzimas necesarias para que ellos puedan crecer en un nuevo medio ambiente.

En esta fase no hay incremento en el número de células, pero hay gran actividad metabólica, aumento en el tamaño individual de las células, en el contenido proteico, ADN y peso seco de las células.

Si un cultivo que está creciendo en fase exponencial es inoculado al mismo medio de cultivo bajo las mismas condiciones de crecimiento, no se observa fase de latencia y el crecimiento exponencial sigue a la misma velocidad. Si el inóculo se toma de un cultivo viejo (fase estacionaria) y se inocula en el mismo medio, generalmente se presenta la fase de latencia esto se debe a que las células generalmente agotan una serie de coenzimas esenciales u otros constituyentes celulares y se requiere cierto tiempo para su resíntesis.

También se observa latencia cuando el inóculo está formado por células que han sido dañadas pero no muertas, bien sea por tratamiento con calor, radiaciones o sustancias químicas, puesto que requieren reparar dicho daño.

En el caso de que una población se transfiera de un medio de cultivo rico a un medio pobre, se observa latencia puesto que es necesario que las células para poder seguir creciendo tengan una serie de enzimas para poder sintetizar algunos metabolitos esenciales que no están presentes en el medio.

## **Fase exponencial o fase logarítmica**

Es el período de la curva de crecimiento en el cual el microorganismo crece exponencialmente, es decir que cada vez que pasa un tiempo de generación la población se duplica. Bajo condiciones apropiadas la velocidad de crecimiento es máxima. Las condiciones ambientales (temperatura, composición del medio de cultivo, etc.) afectan a la velocidad de crecimiento exponencial.

---

## **Fase estacionaria**

En cultivos en recipientes cerrados una población no puede crecer indefinidamente en forma exponencial. Las limitaciones del crecimiento ocurren ya sea por agotamiento de algún nutriente esencial, por acumulación de productos tóxicos, porque se alcance un número de células elevado para el espacio disponible o por una combinación de las causas anteriores. Este periodo durante el cual cesa el crecimiento se conoce como fase estacionaria.

## **Fase de muerte**

Si la incubación continúa después de que una población microbiana alcanza la fase estacionaria, las células pueden seguir vivas y continuar metabolizando, pero va a comenzar una disminución progresiva en el número de células viables y cuando esto ocurre se dice que la población ha entrado en fase de muerte.

### **2.2.2 Parámetros de Operación de los Reactores Biológicos**

A medida que los núcleos de poblaciones aumentan tanto en número como en tamaño, el problema de la contaminación del agua se agudiza de manera, en la mayoría de los casos, alarmante. La construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales forma parte importante de la solución para resolver el problema, sin embargo, para que estos sistemas de tratamiento lleven a cabo de manera correcta su función, es necesaria su operación y mantenimiento continuo y adecuado. De los procesos de tratamiento biológico de agua residual, el de lodos activados y sus modificaciones, es de los sistemas que mayor aplicación tienen, de acuerdo al reporte de la Comisión Nacional del Agua, en el año de 2007, el 41 % del agua residual que se trata en la República Mexicana se realiza mediante el proceso de lodos activados (1), que como se comenta, para su correcta operación se requieren análisis periódicos de laboratorio y personal calificado, entre otros requerimientos de materiales y humanos. En algunas ocasiones la operación de los sistemas de tratamiento de agua residual, se realiza de manera empírica, sin tomar en consideración los parámetros que sirvieron de base para el diseño, y que en la mayoría de los casos son los que se deberían utilizar para la operación del sistema, ocasionando con esto eficiencias de tratamiento por debajo del diseño. Uno de los principales inconvenientes para utilizar estos parámetros, como son la relación alimento microorganismos, tiempo de retención celular, carga orgánica y otros, es que requieren de análisis de laboratorio, que utilizan recursos humanos y equipos especializados.

---

## Factores que afectan el proceso de lodos activados

Concentración del agua residual: La materia orgánica que contiene el agua residual, actúa como fuente de alimento para los microorganismos, en un sistema de lodos activados; por lo tanto, un cambio significativo en las características del agua (por ejemplo, carga de demanda bioquímica de oxígeno DBO5 o demanda química de oxígeno DQO) afecta el crecimiento de los microorganismos en el sistema de tratamiento. Si la carga de DBO5 se incrementa significativamente, entonces habrá demasiado alimento para los microorganismos. Este exceso de alimento se reflejará en un rápido incremento de la población, este efecto genera un lodo “joven” caracterizado por un crecimiento disperso y como resultado una pobre sedimentación en el sedimentador secundario, además algunos organismos saldrán a través del efluente, causando un incremento en la DBO5.

Por otra parte, si la carga de DBO5 disminuye en forma considerable, no habrá suficiente alimento, la tasa de crecimiento puede disminuir, en este caso una sedimentación del lodo no arrastra material fino coloidal, dando como resultado un aumento en la concentración de sólidos suspendidos en el efluente de la planta. Valores típicos de DBO y DQO, para un agua municipal, son los siguientes.

Tabla 4. Valores típicos de DBO y DQO

| Punto de muestreo   | Concentración |         |
|---------------------|---------------|---------|
|                     | DBO,mg/L      | DQO, mg |
| Afluente            | 400-110       | 780-200 |
| Efluente primario   | 100-50        | 300-150 |
| Efluente secundario | 30-15         | 100-50  |

A fin de controlar la actividad microbiológica y las condiciones ambientales en los reactores de digestión anaerobia, existen diversos parámetros de operación que permiten manejar el proceso y controlar las reacciones que se producen al interior del reactor.

### Concentración de oxígeno

Las bacterias metanogénicas son anaerobias estrictas, es decir, el oxígeno para ellas constituye un elemento tóxico. No obstante, dado que en general todos los procesos se realizan en un solo reactor y las poblaciones bacterianas encargadas de las distintas etapas

---

cohabitan, en caso de producirse ingreso de oxígeno al reactor, éste puede ser consumido por las bacterias hidrolíticas y ácido génicas ya que éstas son anaerobias facultativas (pueden crecer en presencia o ausencia de oxígeno).

De todas formas, debe cuidarse el grado de inclusión de oxígeno en el ambiente de los reactores a fin de no poner en peligro la población de bacterias metanogénicas. Si es necesario adicionar pequeñas dosis de aire para la desulfuración, ésta debe ser muy controlada para evitar la presencia de oxígeno en el medio líquido.

## **Temperatura**

Este factor es crucial para asegurar la eficiencia del proceso de degradación de la materia orgánica. Las bacterias metanogénicas involucradas en el proceso de descomposición presentan diferentes velocidades de degradación de la materia orgánica en función de la temperatura.

Dependiendo del rango de temperatura en el que las bacterias se desarrollen se distingue entre:

- bacterias psicofísicas (hasta los 25°C, bajo grado de actividad metanogénica)
- bacterias mesofílicas (32 a 42 °C, grado de actividad mediano)
- bacterias termofílicas (50 a 57 °C, grado de actividad alto)

En general, las plantas productoras de biogás trabajan en el rango mesofílico, dado que en el rango termofílico, si bien se tiene una mayor actividad microbiana, el gasto energético es notablemente mayor en comparación con el rango mesofílico.

## **pH**

El control de este parámetro resulta, muy importante ya que el proceso de degradación anaerobia de la materia orgánica debe realizarse entre un rango de pH entre 6,8 y 7,5. Esto está determinado dado que las bacterias acetogénicas y metanogénicas, quienes regulan el proceso, son muy sensibles a altos valores de acidez lo que a su vez genera una

---

disminución en el pH. Un pH menor a 6.5 implica acidificación del reactor y, por tanto, una inhibición de las bacterias metanogénicas. Sin embargo, las bacterias encargadas de las etapas de hidrólisis y acidogénesis presen tan alta actividad en medios más ácidos, con un pH óptimo entre 4.5 y 6.3, por lo que un reactor a ese pH logrará una solubilización de la materia orgánica pero no una metanización.

### **Nutrientes y compuestos inhibidores**

Adicionalmente a la materia orgánica que es degradada por las bacterias, éstas requieren otros nutrientes para su desarrollo. La relación C: N:P:S debiera establecerse alrededor de 600:15:5:1, a fin de proveer a los microorganismos de las condiciones adecuadas para su desarrollo. Una carencia en un nutriente puede provocar una disminución en la actividad microbiana y, por ende, en la velocidad de producción de metano. Las concentraciones de posibles compuestos inhibidores son también un factor importante para la estabilidad del proceso. Respecto de inhibidores, deben considerarse la presencia de compuestos como metales pesados, amoníaco, pesticidas, sanitizantes, antibióticos u otros compuestos.

### **Carga orgánica volumétrica, OLR**

Este parámetro indica la cantidad de materia orgánica que puede tratar el reactor por unidad de volumen. Considerando que la carga orgánica es el producto del caudal por la concentración de la materia orgánica expresada en DQO, la OLR puede definirse como:

$$OLR = \frac{kg \text{ DQO}}{m^3}$$

### **Velocidad de carga orgánica, VCO**

Este parámetro indica la cantidad de materia orgánica con que se alimenta el reactor, por unidad de tiempo (día) y por unidad de volumen del reactor. Considerando que el parámetro Sólidos Volátiles (SV) equivale a la materia orgánica contenida en un sustrato, la VCO puede definirse como:

---

$$VCO = \frac{kg\ SV}{m^3 \cdot d}$$

Al fijar el valor de la VCO y conociendo la cantidad y composición del sustrato disponible puede calcularse el volumen de reactor requerido para asegurar la estabilidad del proceso. Una sobrecarga del reactor (VCO alta) puede producir un exceso de producción de ácidos en las primeras etapas del proceso, lo que puede provocar la inhibición parcial o total de la actividad metanogénica.

### **Tiempo de residencia hidráulico, TRH**

Este parámetro indica la cantidad de tiempo promedio que los sustratos permanecen en el reactor, cuando se tienen procesos de flujo continuo. En general el sustrato está en condiciones de humedad que permite asumir aditividad de los volúmenes y, por tanto, el tiempo de retención hidráulico puede definirse como:

$$TRH = \frac{V}{Q_E}$$

Donde V es el volumen neto del reactor (en m<sup>3</sup>) y Q<sub>E</sub> el caudal volumétrico de entrada (en m<sup>3</sup>/d). En general, si la degradación ocurre en un proceso por lotes, durante los primeros 20 a 30 días se degrada la mayor cantidad de materia orgánica. A partir de ahí, la degradación decae asintóticamente hasta un valor máximo para cada tipo de sustrato. Para el caso de residuos sólidos orgánicos agroindustriales y estiércol de animales en general los reactores se diseñan para tiempos de residencia mayores de 16 a 25 días.

### **Grado de mezcla del reactor**

La actividad biológica depende fuertemente del contacto que tengan los microorganismos con la materia orgánica contenida en el sustrato. Por esta razón, debe asegurarse una mezcla suficiente del sustrato recién ingresado con el sustrato ya parcialmente digerido, que contiene la población bacteriana. Para asegurar una mezcla suficiente y evitar la separación de las poblaciones bacterianas, la práctica común es utilizar agitadores de rotación lenta y mezclas discontinuas a intervalos de tiempo. También puede realizarse

---

una agitación local que provoque la mezcla lenta del sustrato en el reactor a través de la generación de corrientes de flujo (uso de agitadores de propela). En general, la mezcla no es intensiva, pero si lo suficiente para asegurar la mezcla completa.

### **Potencial bioquímico de metano, PBM**

El potencial bioquímico de metano (PBM) o también simplificado como BMP por sus siglas en ingles es una medición rápida de bajo costo y se aplica principalmente a sustratos sólidos y tiene los siguientes objetivos:

- Calcular la biodegradabilidad anaerobia y la máxima producción de  $\text{CH}_4$  de residuos orgánicos.
- Identificar el potencial de producción de energía de un sustrato.
- Seleccionar inóculos a fin de conocer su capacidad de adaptación o inhibición frente al sustrato.
- Predecir el funcionamiento de digestores a escala real.

La velocidad de crecimiento exponencial se expresa como tiempo de generación (G) y este se define como el tiempo que tarda una población en duplicarse. Los tiempos de generación varían ampliamente entre los microorganismos, algunos crecen rápidamente y presentan tiempos de generación de unos 30 minutos y otros tienen tiempos de generación de varias horas.

En la siguiente tabla se presenta un experimento de crecimiento partiendo de una célula (bacteria), que tiene un tiempo de generación de 30 minutos.

Tabla5. Ejemplo de crecimiento celular

| Tiempo (horas) | Número de células | Log del número de células |
|----------------|-------------------|---------------------------|
| 0              | 1                 | 0                         |
| 0,5            | 2                 | 0,301                     |
| 1              | 4                 | 0,602                     |
| 1,5            | 8                 | 0,903                     |
| 2              | 16                | 1,204                     |
| 2,5            | 32                | 1,505                     |
| 3              | 64                | 1,806                     |
| 3,5            | 128               | 2,107                     |
| 4              | 256               | 2,408                     |
| 4,5            | 512               | 2,709                     |
| 5              | 1024              | 3,0103                    |
| .              | .                 | .                         |
| .              | .                 | .                         |
| 10             | 1048576           | 6,021                     |

## 2.4 Procesos Biológicos de Tipo Anaerobio

El tratamiento anaerobio es una de las tecnologías más antiguas para estabilizar los residuos y aguas residuales principalmente para el tratamiento de residuos domésticos (aguas) en fosas sépticas, el tratamiento de lodos en digestores y para el tratamiento de lodos de depuradoras en plantas de tratamiento municipales.

La necesidad de sistemas de tratamiento más rentables para la industria alimentaria, combinada con la aparición de una crisis petrolera internacional, fue la fuerza impulsora que estimuló la creación de reactores en los años setenta en el campo de la digestión anaerobia.

El tratamiento anaerobio consiste en un proceso realizado por grupos bacterianos específicos que en ausencia de oxígeno transforman la materia orgánica en una mezcla de gases fundamentalmente metano y CO<sub>2</sub>, conocida como biogás. La materia orgánica puede estar compuesta por residuos sólidos orgánicos o aguas residuales provenientes de las industrias con contenido de materia orgánica

El proceso de digestión anaerobia para la generación de biogás se realiza normalmente en tanques cerrados denominados reactores y presenta beneficios económicos y ambientales como consecuencia de la

producción de energía. Tal como se muestra en la Figura 2, como producto de la degradación de la materia orgánica se obtienen: (1) biogás de elevado poder energético (2) un lodo estabilizado que es el producto resultante del crecimiento microbiano generado como consecuencia del proceso de digestión, así como también de sólidos no digeridos que han sido estabilizados.

Este lodo puede ser utilizado en agricultura o en la recuperación de suelos degradados que presenten carencia, especialmente de materia orgánica.

El proceso de producción de biogás puede esquematizarse en cuatro etapas principales, de acuerdo a lo mostrado por la Figura 3. Las poblaciones bacterianas involucradas en cada una de las etapas del proceso cumplen roles específicos y requieren condiciones ambientales apropiadas para su crecimiento y viabilidad. La mantención y estabilidad de estas condiciones al interior de los reactores utilizados para digestión anaerobia representa, entonces, el desafío principal de toda la operación para este tipo de plantas.

Figura 2. Diagrama de Digestion Anaerobia

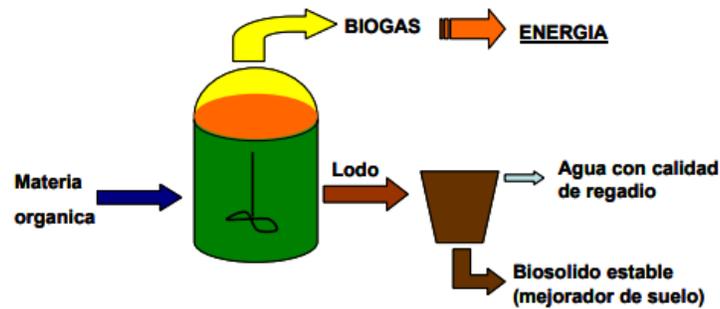
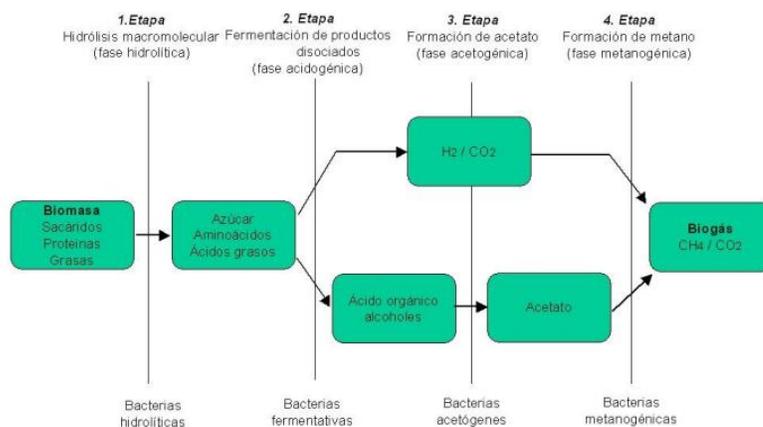


Figura 3. Las 4 etapas de la digestion Anaerobia



El biogás producido por la descomposición microbiológica está compuesto principalmente de metano y de dióxido de carbono. Dependiendo de los contenidos de grasas, carbohidratos y proteínas de los distintos sustratos, la fracción de metano contenida en el biogás varía desde valores que van de 50 a 75%. En la Tabla 6 pueden observarse los principales componentes del biogás y los rangos en que varían sus diferentes concentraciones.

La tabla 6 nos muestra Rangos de composición del biogás. La concentración de ácido sulfhídrico usualmente varía de 150 a 3000 ppm. Esta concentración puede variar dependiendo de la concentración de azufre en el agua residual del afluente.

Tabla 6. Variación dependiendo de la concentración de azufre

| Componente                             | Concentración en % (volumen) |
|--|------------------------------|
| Metano (CH <sub>4</sub> )              | 50-75%                       |
| Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ), | 45-25%                       |
| Vapor de Agua (H <sub>2</sub> O)       | 2 - 7%                       |
| Nitrógeno (N <sub>2</sub> )            | <2%                          |
| Oxígeno (O <sub>2</sub> )              | <2%                          |
| Hidrógeno (H <sub>2</sub> )            | <1%                          |
| Amoniac (NH <sub>3</sub> )             | <1%                          |
| Ácido Sulfhídrico (H <sub>2</sub> S)   | <5%                          |

En el caso que las cuatro etapas indicadas en la Figura 2 se realicen en un mismo reactor se denomina proceso de una etapa y si existe una separación física de las dos primeras etapas y las dos últimas, corresponde a un proceso de dos etapas. En el caso de las plantas de biogás comerciales existentes en Europa, se utilizan sistemas de una etapa.

Esto principalmente porque, en general, los sistemas de dos etapas requieren inversiones y costos de operación más altos y son utilizados para mejorar la fase hidrolítica. Sin embargo, esto sólo se justifica para

---

casos de sustratos de difícil degradación o procesos en los que se quiere evitar una eventual inestabilidad (degradación de residuos con alto contenido de sólidos y sólidos volátiles y con cambios frecuentes en la alimentación de los reactores).

En general, las plantas de biogás comerciales trabajan en procesos de tipo continuo, es decir, los digestores son alimentados continuamente (input) y tanto el biogás como el lodo digerido son retirados del reactor en la misma medida (output).

La materia orgánica utilizada para la producción de biogás se conoce con el nombre de sustrato. En general, los sustratos más utilizados para la producción de biogás son residuos orgánicos de diversa naturaleza, dado que, sea por razones de necesidad de tratamiento, o disposición o para un eventual mejor aprovechamiento de las materias primas, corresponden a materia orgánica de costo cero o cuyo tratamiento y utilización puede significar incluso un ahorro de costos.

También es posible que el sustrato utilizado corresponda a las aguas residuales de las industrias con alto contenido de materia orgánica, por ejemplo, efluentes de la industria vitivinícola, de la elaboración de productos lácteos, del beneficio de ganado, entre otros.

La experiencia en diversos países, principalmente en Alemania, muestra que también es posible utilizar materia orgánica proveniente de determinados cultivos. Sin embargo, este uso está asociado a subvenciones a la energía que permiten cubrir los mayores costos asociados al sustrato.

La composición del sustrato utilizado determina la cantidad y composición final del biogás producido. En general, las grasas y aceites tienen un rendimiento en biogás (medido como  $\text{m}^3/\text{t SV}$ ) mayor, con un contenido de metano medio. Las proteínas tienen un rendimiento comparativamente más bajo, con un contenido de metano mayor.

En el caso de los carbohidratos, éstos tienen un rendimiento medio, con un menor contenido de metano. La humedad en el interior del reactor es también de vital importancia, tanto para el proceso biológico (las bacterias requieren agua para su supervivencia) como para efectos de mezcla y manejo al interior del reactor y los sistemas de alimentación de la planta.

---

La Tabla 2 muestra los rangos de rendimiento y concentración de metano para los distintos tipos de compuestos orgánicos.

Tabla 7. Rangos de rendimiento y concentración de metano

| <b>Grupos de sustancias</b> | <b>Rendimiento Biogás (m<sup>3</sup>/t SV)</b> | <b>Fracción de Metano (%)</b> |
|-----------------------------|--|-------------------------------|
| Proteínas digeribles        | 600-700  | 70-75                         |
| Grasas digeribles           | 1000-1250                                      | 68-73                         |
| Carbohidratos               | 700-800  | 50-55                         |

En general, debe evitarse el uso de sustratos de alto contenido de lignina, como aserrín, hojas secas, etc., dado que ésta no se descompone fácilmente por métodos biológicos y genera una barrera que impide la degradación de los otros compuestos.

Esto puede generar como efecto colateral la formación de capas flotantes en los reactores, las que impiden la mezcla del sustrato al interior del mismo y, con ello, se inhibe hasta grados muy significativos la actividad bacteriana.

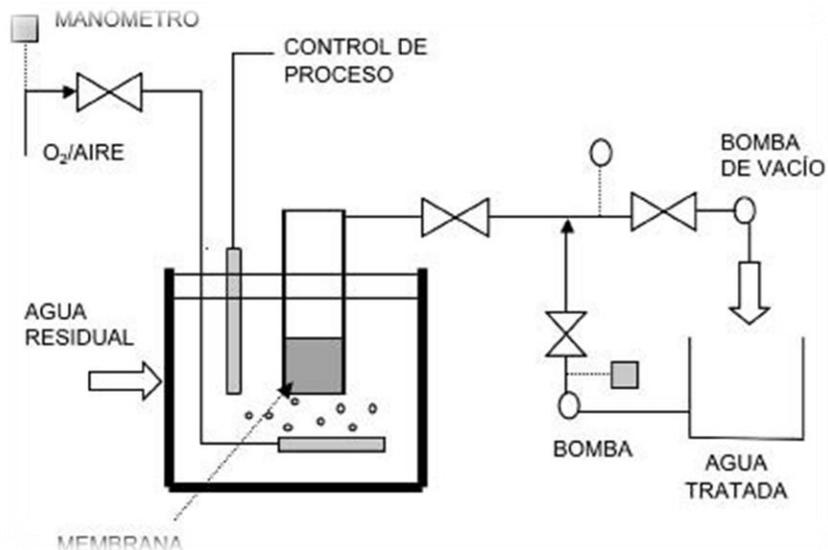
Debido a que, comúnmente, la composición de los distintos sustratos varía dentro de determinados rangos, en forma genérica no es posible entregar un valor categórico respecto de la productividad y la composición del biogás proveniente de ellos.

Sin embargo, es posible entregar rangos de valores que, en líneas generales, son válidos para los distintos tipos de sustrato. Para casos de la evaluación exhaustiva de algún proyecto concreto, con un tipo definido de sustrato, es conveniente tomar muestras representativas del mismo, estudiar la composición del sustrato y realizar ensayos de degradabilidad anaerobia. De esta forma, pueden obtenerse valores más acertados de la productividad para una planta de biogás, disminuyendo así en forma significativa la incertidumbre en la evaluación.

## 2.4.2 Biorreactor de Membranas

Un MBR se compone de dos partes integradas en una sola: por un lado, el reactor biológico responsable de la depuración biológica y, por otro, la separación física de la biomasa y el agua mediante un sistema de filtración directa hecha con membranas. La ventaja de los sistemas MBR se deriva de las elevadas concentraciones de biomasa con las que se trabaja en el reactor biológico gracias a la presencia de una barrera física (membrana) que no deja pasar las bacterias. El reactor es operado de manera similar a un proceso convencional de lodos activados, pero sin que sea necesaria una etapa secundaria, como la clarificación, o una terciaria, como la filtración con arena. Una vez seleccionada la tecnología MBR como la indicada para un proyecto concreto, es momento de analizar la configuración más adecuada según un criterio técnico y económico.

Figura 4. Esquema de un biorreactor de membrana integrada sumergida



### Biorreactores de membranas vs tecnologías convencionales

Las técnicas biológicas de tratamiento de aguas residuales son muy antiguas y se vienen usando desde hace aproximadamente cien años. De todos los procesos que se han desarrollado para el tratamiento de las aguas residuales, el sistema convencional de lodos activados ha sido el más empleado. En un principio, la tecnología de membrana tenía limitado su uso y solamente se usaba como un añadido en el proceso

---

convencional. La microfiltración, la ultrafiltración y la osmosis inversa se utilizaron en áreas donde había requerimientos de vertido muy rigurosos o donde se pretendía reutilizar el agua depurada. Los principales factores que limitaron el desarrollo de la tecnología de membrana fueron el elevado costo de inversión y de operación y el inadecuado conocimiento de las ventajas potenciales de las membranas en el tratamiento de las aguas residuales. Sin embargo, la aparición de módulos de membrana menos costosos y más efectivos, junto con el endurecimiento de los requisitos de vertido, hicieron que se volviera a tener interés en la tecnología de membrana. El balance económico es favorable a los MBR si se tiene en cuenta una serie de ventajas importantes, al margen de la excelente calidad de agua tratada que se consigue. De este modo, la tecnología MBR es especialmente valiosa frente a las otras tecnologías por las siguientes características:

Hay una retención eficaz de los sólidos suspendidos y de los compuestos más solubles dentro del biorreactor, lo que proporciona un efluente de excelente calidad y potencialmente reutilizable que cumple los requisitos de vertido más rigurosos.

Se logra la retención de las bacterias y virus y un efluente estéril, lo que elimina la necesidad de llevar a cabo costosos procesos de desinfección, eliminando también la peligrosidad que llevan asociada los productos de la desinfección.

La ausencia del clarificador, que también actúa como un selector natural de la población bacteriana, permite que se desarrollen bacterias de crecimiento lento y que persistan en el biorreactor.

La mayor parte de las plantas MBR operan a edades de lodo de 40 días o superiores. Estas edades de lodo elevadas pueden reducir en 40% la producción de lodo, con la consiguiente reducción de los costos de operación.

### **¿Cómo elegir la configuración de un MBR?**

No existe una forma universal y única de acoplamiento entre un reactor biológico y la separación de líquidos y sólidos. Tampoco existe un tipo de MBR que sea claramente superior a otra. Hay en el mercado una multitud de opciones cuya elección dependerá de los requerimientos del usuario según un criterio técnico y económico. Sin embargo, un aspecto importante a considerar en la elección de la tecnología es la configuración del MBR. Distinguimos dos tipos principales de biorreactores de membrana con base en su configuración:

---

De membrana integrada o sumergida. La unidad de membrana que realiza la separación física está inmersa en el tanque biológico. Se obtiene la fuerza impulsora a través de la membrana presurizando el biorreactor o creando una presión negativa en el lado permeado de la membrana. Generalmente se coloca un difusor de aire justo debajo del módulo de la membrana para suministrar el aire necesario para homogeneizar el contenido del tanque, para el proceso biológico y para la propia limpieza de la membrana.

MBR externo o con recirculación. Esta configuración MBR implica que la mezcla es recirculada desde el biorreactor hasta la unidad de membrana que se dispone externamente a la unidad biológica. La fuerza impulsora es la presión creada por la alta velocidad del flujo a través de la superficie de la membrana.

La aparición de membranas poliméricas menos costosas y más resistentes y los requerimientos de presión menores y la obtención de un flujo permeado mayor, han aumentado el uso mundial de los MBR sumergidos.

Se han usado varios tipos y configuraciones de membranas en el proceso MBR: a) según su forma, se pueden encontrar unidades MBR con membranas planas, tubulares, de disco rotatorio o de fibra hueca; b) atendiendo a su composición, pueden ser orgánicas o inorgánicas (cerámicas, fundamentalmente); c) respecto al tamaño de poro, pueden ser de microfiltración (separa sustancias suspendidas de hasta una décima de micra) o de ultrafiltración (elimina sustancias suspendidas de hasta un centésimo de micra). La composición del agua de alimentación juega un papel importante al momento de seleccionar el tipo de membrana. Asimismo, para obtener un rendimiento óptimo las membranas usadas en la unidad MBR deben satisfacer una serie de criterios: ser inertes y biodegradables, fáciles de limpiar y de regenerar, resistentes a los agentes químicos y a las presiones y temperaturas elevadas, con poros uniformes y elevada porosidad, neutras o con carga negativa para evitar la adsorción de los microorganismos, y ser duraderas y fáciles de reemplazar.

### **Aspectos técnicos y económicos en un MBR**

Al momento de decidir qué MBR utilizar, hay que considerar el costo global (inversión, explotación) de la solución y su durabilidad (capacidad de evolución, producción de lodos, etc.).

#### **Equipos-electromecánicos**

Uno de los costos importantes en un MBR es el debido propiamente al sistema de filtración, ya que este involucra bombas, tuberías e instrumentación asociada y oscila entre 10 y 35% del total de la instalación para el tratamiento biológico. Este costo varía y depende fundamentalmente de la dimensión del módulo

---

(origen y composición del agua residual y temperatura) y del diseño de las membranas (material, composición, configuración, etc.).

## **Áreas de aplicación**

Las principales áreas de aplicación e investigación para los MBR son a la fecha seis: revisiones críticas, aspectos fundamentales, tratamiento de aguas residuales municipales y domésticas, aguas residuales industriales, tratamiento para purificación de agua y otras, las cuales incluyen la remoción de gas, el tratamiento de lodos y la producción de hidrógeno. Con lo anterior, se puede observar que la aplicación e investigación en este campo está cobrando una importancia extraordinaria ya que la profundización en los fundamentos de la tecnología es básica para lograr un óptimo rendimiento de los MBR.

### **2.5 Sistemas de Tratamiento Anóxicos**

Este proceso está diseñado para eliminar del agua no sólo la materia orgánica contaminante, sino también nitrógeno amoniacal, todo esto en un menor espacio.

Consta de tres módulos que son: un reactor anaerobio de lecho de lodos con flujo ascendente UASB, un reactor desnitrificador (anóxico) y un reactor nitrificador empacado (filtro sumergido). Existe una corriente de recirculación entre los reactores nitrificador y desnitrificador. En el reactor desnitrificador, el nitrógeno oxidado se transforma en nitrógeno molecular ( $N_2$ ) inocuo al medio ambiente, y se ventea a la atmósfera, con lo que se logra su eliminación del agua.

### **2.6 Procesos Biológicos de Tipo Aerobio**

Podemos definir los “Procesos Biológicos de Depuración Aerobia”, como aquellos realizados por determinado grupo de microorganismos (principalmente bacterias y protozoos) que, en presencia de oxígeno, actúan sobre la materia orgánica e inorgánica disuelta, suspendida y coloidal existente en el agua residual, transformándola en gases y materia celular, que puede separarse fácilmente mediante sedimentación. La unión de materia orgánica, bacterias y sustancias minerales forma los flóculos y el conjunto de flóculos es lo que todos conocemos como lodo biológico.

---

Los objetivos que persigue este tipo de tratamiento son la transformación de la materia orgánica y la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables. En el caso de algunas aguas residuales urbanas, también se persigue la eliminación de nitrógeno y de fósforo. Por último, conseguimos además la disminución de los microorganismos patógenos y fecales que habitan el agua residual.

Básicamente, existen dos tipos de tratamientos biológicos aerobios:

- Procesos de Cultivo en Suspensión (Lodos Activados).
- Procesos de Cultivo Fijo (Lechos Bacterianos).

En este capítulo, nos vamos a centrar en como suceden los mecanismos de depuración biológica aerobia y más concretamente en el proceso de Lodos Activos, siendo los Lechos Bacterianos objeto del capítulo siguiente.

## **Procesos de Cultivo en Suspensión**

Se entiende por tratamiento biológico en medio suspendido todos aquellos tratamientos biológicos que tienen el medio activo conocido como Biomasa, dicho medio se encuentra suspendido en el sustrato o agua residual y en este existe una mezcla entre bacterias estabilizadoras y el alimento o sustrato que conforma lo que se llama el licor mixto (Orozco & Salazar, 2001). Dichos procesos en cultivos en suspensión manejan procesos y métodos parecidos y pueden tener muy pocas variaciones.

### **2.7 Procesos biológicos de cultivo en suspensión**

#### **Lodos activados**

Los lodos activados componen el sistema más sofisticado del tratamiento biológico en medio suspendido, pues en él, la biomasa o medio activo se encuentra altamente concentrado con relación al sustrato, razón por la cual es necesario controlar el medio ambiental de manera muy estricta para no provocar condiciones que desequilibren el proceso. Sucede lo contrario con las lagunas de tratamiento ya que estas manejan una cantidad de biomasa muy pequeña en relación con la concentración del sustrato por lo que la operación de este proceso no es tan rígida (Orozco & Salazar, 2001)

---

Este tipo de proceso aerobio es en realidad un tratamiento biológico simple, se utilizan algunos componentes que se aplican a procesos convencionales y se emplean además elementos mecanizados para transferir oxígeno. No recircula lodos a diferencia de los lodos activados y aunque se derivan fundamentalmente de las lagunas de estabilización. Su funcionamiento es diferente debido a que el oxígeno presente se obtiene de forma mecánica, por lo que las algas no presentan parte sustancial del proceso biológico (Orozco & Salazar, 2001).

Este sistema es un proceso de lodos activados sin retorno, por lo que muchos técnicos plantean hacerlo así.

### **Eliminación biológica de nutrientes**

Son procesos derivados de los lodos activados, pero con mayor complejidad. El proceso de eliminación de fósforo es en esencia, un proceso de lodos activados que incluye un RCTA anaerobio previo, mientras que el de eliminación de nitrógeno, incluye una etapa anóxica previa.

El tratamiento de lodos se utiliza para la estabilización de lodos purgados como exceso en los tratamientos biológicos, principalmente en los lodos activados y de los lodos primarios.

Los procesos que se han utilizado en el tratamiento de aguas residuales, sobre todo en el tratamiento secundario se basan en procesos biológicos, pueden desarrollarse en medios con presencia o ausencia de oxígeno, y básicamente consiste en controlar el crecimiento y la reproducción de microorganismos que se encargarán del tratamiento de las aguas residuales. Dentro de los procesos se encuentran los cultivos en suspensión que son aquellos en donde los microorganismos responsables de la conversión de la materia orgánica u otros constituyentes del agua residual en gases y tejido celular, se mantienen en suspensión dentro del líquido.

A los lodos activados, el agua residual y el lodo biológico (microorganismos) son mezclados e inyectados con aire en un reactor; luego hay un proceso de sedimentación en donde se originan los flóculos biológicos formados en este proceso, y que se sedimentan. Las lagunas aireadas son estanques que han sido excavados y se comportan como reactores de flujo sin recirculación; el oxígeno requerido por los microorganismos presentes, se realiza de forma mecánica.

---

## **2.8 Biorreactores de Membrana**

Las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales y para su reutilización abarcan un número enorme de opciones. Comparados con los procesos convencionales de tratamiento de las aguas residuales, los biorreactores con membrana (MBR) ofrecen muchas ventajas: alta eficiencia de remoción, baja producción de lodos y uso de menores espacios para su instalación. A pesar de que la tecnología MBR se presenta como una novedosa forma de depuración de las aguas, su investigación y comercialización comenzó hace unos treinta años, cuando se empezó a considerar como un sistema óptimo para el tratamiento de las aguas residuales la combinación de membranas y un proceso biológico.

## **2.9 Normas Oficiales Mexicanas SEMARNAT**

Al momento de diseñar sistemas de tratamiento de aguas residuales, se debe tener siempre presente que los límites a los que se reducirán los contaminantes, deben ser aquellos estipulados en las leyes vigentes del país donde será construida la planta de tratamiento. Es por ello, que los valores a los que se deben ajustar las plantas construidas en México están estipulados en las Normas Oficiales Mexicanas de SEMARNAT.

### **2.9.1 NOM-001-SEMARNAT-1996**

Esta norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. En ella se dan a conocer los contaminantes que pueden contener dichas descargas y los valores máximos que deberán contener los efluentes a la salida de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, dependiendo a dónde se deseen arrojar.

La siguiente tabla es extraída de esta norma, la cual nos dicta todos los valores a cumplir en los caudales de salida posterior al tratamiento del agua residual.

Tabla 8. Límites Máximos Permisibles de Contaminantes Básicos según la NOM-001-SEMARNAT-1996

| LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS                  |                           |         |                        |         |                                 |         |                                   |         |                        |         |   |         |                |         |               |         |                           |         |                         |         |    |
|---|---------------------------|---------|------------------------|---------|---------------------------------|---------|-----------------------------------|---------|------------------------|---------|---|---------|----------------|---------|---------------|---------|---------------------------|---------|-------------------------|---------|----|
| PARÁMETROS<br><br>(miligramos por litro, excepto cuando se especifique) | RÍOS                      |         |                        |         |                                 |         | EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES |         |                        |         | AGUAS COSTERAS                                    |         |                |         |               |         | SUELO                     |         |                         |         |    |
|   | Uso en riego agrícola (A) |         | Uso Público Urbano (B) |         | Protección de vida acuática (C) |         | Uso en riego agrícola (B)         |         | Uso público urbano (C) |         | Explotación pesquera, navegación y otros usos (A) |         | Recreación (B) |         | Estuarios (B) |         | Uso en riego agrícola (A) |         | Humedales naturales (B) |         |    |
|   | P.M.                      | P.D.    | P.M.                   | P.D.    | P.M.                            | P.D.    | P.M.                              | P.D.    | P.M.                   | P.D.    | P.M.  | P.D.    | P.M.           | P.D.    | P.M.          | P.D.    | P.M.                      | P.D.    | P.M.                    | P.D.    |    |
| Temperatura °C (1)  | N.A.                      | N.A.    | 40                     | 40      | 40                              | 40      | 40                                | 40      | 40                     | 40      | 40  | 40      | 40             | 40      | 40            | 40      | 40                        | N.A.    | N.A.                    | 40      | 40 |
| Grasas y Aceites (2)  | 15                        | 25      | 15                     | 25      | 15                              | 25      | 15                                | 25      | 15                     | 25      | 15  | 25      | 15             | 25      | 15            | 25      | 15                        | 25      | 15                      | 25      |    |
| Materia Flotante (3)  | ausente                   | ausente | ausente                | ausente | ausente                         | ausente | ausente                           | ausente | ausente                | ausente | ausente   | ausente | ausente        | ausente | ausente       | ausente | ausente                   | ausente | ausente                 | ausente |    |
| Sólidos Sedimentables (ml/l)  | 1                         | 2       | 1                      | 2       | 1                               | 2       | 1                                 | 2       | 1                      | 2       | 1   | 2       | 1              | 2       | 1             | 2       | N.A.                      | N.A.    | 1                       | 2       |    |
| Sólidos Suspendidos Totales   | 150                       | 200     | 75                     | 125     | 40                              | 60      | 75                                | 125     | 40                     | 60      | 150   | 200     | 75             | 125     | 75            | 125     | N.A.                      | N.A.    | 75                      | 125     |    |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno <sub>5</sub>                              | 150                       | 200     | 75                     | 150     | 30                              | 60      | 75                                | 150     | 30                     | 60      | 150   | 200     | 75             | 150     | 75            | 150     | N.A.                      | N.A.    | 75                      | 150     |    |
| Nitrógeno Total   | 40                        | 60      | 40                     | 60      | 15                              | 25      | 40                                | 60      | 15                     | 25      | N.A.  | N.A.    | N.A.           | N.A.    | 15            | 25      | N.A.                      | N.A.    | N.A.                    | N.A.    |    |
| Fósforo Total   | 20                        | 30      | 20                     | 30      | 5                               | 10      | 20                                | 30      | 5                      | 10      | N.A.  | N.A.    | N.A.           | N.A.    | 5             | 10      | N.A.                      | N.A.    | N.A.                    | N.A.    |    |

### 2.9.2 NOM-003-SEMARNAT-1997

En esta norma se establecen los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Dichos contaminantes y sus límites son presentados en la siguiente tabla, extraída de la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Tabla 9. Límites Máximos Permisibles de Contaminantes según la NOM-003-SEMARNAT-1997

| LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES                  |                                  |                             |                          |                       |          |
|---|----------------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------|----------|
| TIPO DE REUSO   | PROMEDIO MENSUAL                 |                             |                          |                       |          |
|   | Coliformes fecales<br>NMP/100 ml | Huevos de<br>helminto (h/l) | Grasas y<br>aceites mg/l | DBO <sub>5</sub> mg/l | SST mg/l |
| SERVICIOS AL PÚBLICO<br>CON CONTACTO DIRECTO                  | 240                              | ≥ 1                         | 15                       | 20                    | 20       |
| SERVICIOS AL PÚBLICO<br>CON CONTACTO INDIRECTO<br>U OCASIONAL | 1,000                            | ≤ 5                         | 15                       | 30                    | 30       |

### ***CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA***

La metodología que permite controlar los parámetros de funcionamiento es descrita a continuación. La primera fase, el ensayo en el laboratorio puede subdividirse en tres etapas. La primera etapa se realizó con agua limpia, y se hicieron pruebas de estanqueidad, calibrado de bombas, control de presión transmembrana y toma de contacto con el manejo del cuadro de control del sistema. La segunda etapa se trata de un ensayo de la capacidad depurativa de la membrana por sí sola. Durante dos semanas se estuvo alimentando el reactor exclusivamente con agua residual sintética, sin que dentro del tanque se inoculara lodos procedentes de depuradora. En la tercera etapa se inoculó el biorreactor con lodos, la alimentación se realizó con una mezcla al 50% de agua residual sintética y 50% de agua residual procedente de la salida del parque Benito Juárez. Cada dos días se recargaba el tanque de alimentación con dicha mezcla, manteniéndolo en agitación. En esta tercera etapa se efectuaron mediciones de parámetros físico-químicos como: sólidos en suspensión, sólidos volátiles en el licor mixto, turbidez, demanda química de oxígeno, demanda biológica de oxígeno, oxígeno disuelto, pH, temperatura, tasa de consumo de oxígeno y tasa específica de respiración. Todos los análisis se efectuaron siguiendo los métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (APHA-AWWA 1992).

#### **Comprobar nitrógeno total**

El método del ácido cronotrópico. La digestión de un persulfato convierte todas las formas de nitrógeno en

---

nitrate. Luego, la reacción entre el nitrato y el reactivo produce un color amarillo en la muestra. Se utilizó un espectrómetro sintonizado a 420 nm y un reactor de digestión.

El procedimiento es el siguiente:

- Se calentó el reactor Hanna C 9800 a 105 °C (221 °F). Para utilizar el reactor correctamente, siga el manual del reactor. Se recomienda el uso de la protección de seguridad opcional HI740217. No utilice hornos ni hornos de microondas, ya que las muestras con fugas pueden crear un entorno corrosivo y provocar una explosión.
- Se abrieron las tapas de 2 viales de descomposición (el que tiene la tapa roja).
- Se agregó un paquete de persulfato de potasio a cada vial para el análisis de nitrógeno total.
- Se agregó exactamente 0.5 ml de muestra a un vial (vial de muestra) y 0.5 ml de agua desionizada al otro (vial vacío), manteniendo los viales en un ángulo de 45 grados. • cerramos bien la tapa y agitamos vigorosamente el vial durante unos 30 segundos hasta que el polvo se disuelva por completo.
- Se colocaron los viales en el reactor y calentamos durante 30 min a 105°C. Nota: Para obtener resultados más precisos, debemos retirar los viales del reactor exactamente después de 30 minutos.
- Al final del período de digestión, se colocaron con cuidado los viales en una rejilla para enfriar y dejamos que se enfríen a temperatura ambiente. Precaución: dado que los viales todavía están calientes, tenga cuidado al manipularlos.
- Abrimos la tapa del vial y agregamos un paquete de metabisulfito de sodio para el análisis de nitrógeno total a cada vial. Cerramos bien la tapa y agitamos suavemente el vial durante 15 segundos.
- Abrimos la tapa del vial y agregamos un paquete de reactivo de nitrógeno total HI 93767-0 a cada vial. Cerramos bien la tapa y agitamos suavemente el vial durante 15 segundos.

---

Esperamos 2 minutos (sin agitar el vial) para que se complete la reacción.

- Abrimos la tapa de 2 viales de reactivo.
- Se agregó exactamente 2.0 ml de la muestra digerida (del vial con tapa roja del blanco digerido) al vial de reactivo (vial de muestra) y 2.0 ml del blanco digerido (del vial con tapa roja del blanco digerido). En otro vial (vacío), sosteniendo los viales en un ángulo de 45 grados aparte Cierre bien la tapa e invierta los viales 10 veces.
- Se colocó el vial en blanco en el espectrómetro y seleccionamos la opción HR de Nitrógeno Total, presionamos CERO y esperamos a que se calibre la medición.
- Se retiró el vial de blanco y se colocó el vial de muestra en el espectrómetro, se presionó READ DIRECT y momentáneamente aparecerá el valor en mg/l de nitrógeno total. A-2. Reacción de prueba de fósforo. Adaptación del Método 365.2 de la EPA y Método Estándar para Pruebas de Agua y Aguas Residuales, 20<sup>a</sup> Edición, 4500-PE, Método del Ácido Ascórbico. La reacción entre los ortofosfatos y el reactivo produce un color azul en la muestra. Se utilizó un espectrofotómetro calibrado a 610 nm.
- Se seleccionó el número de programa correspondiente a Fósforo, Reactivo en la pantalla secundaria.
- Abrimos la tapa del vial de reactivo.
- Se agregó exactamente 5.0 ml de muestra al vial, sosteniendo el vial en un ángulo de 45 grados.
- Se cubre y se mezcla.
- Se tapó y mezcló invirtiendo el vial varias veces.
- Se marcó el vial con un lápiz en la tira blanca para marcar la orientación. Se utilizó esta señal para colocar el vial de prueba en el soporte del vial en la misma posición en todo momento.

- 
- Se colocó el vial en el soporte del vial y se empujó hasta que estuvo completamente insertado.
  - Se espero unos segundos hasta que la pantalla muestre “-0.0-”. El medidor está ahora en cero y listo para la medición.
  - Se abrió la tapa y se agregó el contenido del paquete de reactivo de fósforo HI 93758-0.
  - Se cerro bien la tapa y se agitó suavemente durante 2 minutos hasta que la mayor parte del polvo se haya disuelto. Esta es la muestra procesada.
  - Se colocó el vial en el soporte del vial y se empujó hasta que estuvo completamente insertado. Se aseguró de que la orientación del vial en relación con el soporte del vial sea la misma que la de la lata vacía.
  - Se presionó TIMER y la pantalla mostró una cuenta regresiva antes de la medición. Alternativamente, esperamos 3 minutos y presionamos LEER EN VIVO. En ambos casos, "SIP" parpadeará durante la medición.
  - El dispositivo muestra directamente la concentración en mg/l de Fosfato (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) en la pantalla.

### **Prueba de demanda química de oxígeno**

La modificación del método 410.4 ha sido aprobada por la USEPA para la determinación de DQO en aguas superficiales y aguas residuales. Los compuestos orgánicos que se oxidan fácilmente reducen los iones de dicromato (naranja) a iones de cromo (verde). Se determina la cantidad de iones de cromo formados.

El espectrómetro se ajustará a 610 nm.

- Se seleccionó una muestra homogénea. Las muestras que contengan sólidos sedimentados deben homogeneizarse con un mezclador.

---

- Se calentó el reactor Hanna C 9800 a 150 °C (302 °F). Para utilizar el reactor correctamente, siga las instrucciones de uso del reactor. Se recomienda el uso de la protección de seguridad opcional HI 740217. No utilice hornos ni hornos de microondas, ya que las muestras con fugas pueden crear un entorno corrosivo y provocar una explosión.

- Abrimos las tapas de 2 viales de reactivo.

- Se agregó exactamente 0.2 ml de muestra a un vial (vial de muestra) y 0.2 ml de agua desionizada al otro (vial vacío), manteniendo los viales en un ángulo de 45 grados. Cierre bien la tapa y mezcle invirtiendo cada vial varias veces. Precaución: Cuando los viales se calienten durante la mezcla, manéjelos con cuidado.

- Se colocaron los viales en el reactor y calentamos durante 2 horas a 150°C.

- Al final de la digestión, apagar el reactor. Esperamos 20 minutos para que la temperatura de los viales baje a 120°C.

- Invierta cada vial varias veces mientras aún está caliente, luego colóquelo en una rejilla para que se enfríe. Precaución: Dado que los viales todavía están calientes, manéjelos con cuidado.

- Se dejaron que los viales en la gradilla de enfriamiento se enfríen a temperatura ambiente. No agite ni invierta más, o las muestras pueden volverse turbias.

- Se seleccionó el número de programa correspondiente a la demanda química de oxígeno, rango alto (COD) en la pantalla secundaria.

- Se colocó el vial vacío en el soporte del vial y se empujó todo lo que se pueda.

- Se presionó CERO y "SIP" parpadeará en la pantalla.

- Se espero unos segundos y la pantalla mostrará “-0.0-”. El medidor está ahora en cero y listo para la medición.

- 
- Se colocó el vial de muestra en el soporte del vial y se empujó hasta el fondo.
  - Se presionó LIVE READ y "SIP" parpadeará durante la medición.
  - Se multiplicó la lectura en la pantalla por 10 para obtener la concentración en mg/L de demanda de oxígeno.

### **Prueba de alcalinidad**

La prueba de alcalinidad se realizó mediante prueba volumétrica, en la cual se dieron 100 ml de muestra 3 a 1, utilizando solución de ácido sulfúrico 0.1 N como valorante y naranja de metilo como indicador. Al llegar al lumen de la muestra junto con el indicador al agregar ácido, leemos el volumen consumido, luego aplicamos la siguiente fórmula que nos dará el valor de alcalinidad:

$$(mg \text{ CaCO}_3) / (L) = (A \times N) / (mL \text{ de } )$$

Donde: A = ml de ácido consumido. N = Nominal de ácido.

Se utilizó un espectrofotómetro portátil multifunción marca Hatch, donde se introdujo una porción de la muestra a una dilución de 2 a 1 y se detectó únicamente el valor que da el instrumento para Sólidos Suspendidos Totales. El método utilizado para medir este valor es la turbidez 54

### **Cálculo y diseño de sistema de tratamiento de aguas residuales**

Para proceder con el diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales, en el caso del Tanque Anaeróbico, el método utilizado se describe en el Libro 29 del Manual de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento de CONAGUA, ilustrando el método de Diseño de Filtro Anaeróbico de Flujo.

Para llevar a cabo el diseño de la etapa aeróbica, es decir, las del biorreactor de membrana, y del tanque de pre-aireación, así como de la fase anóxica, se utiliza la metodología utilizada en el capítulo 8 del libro Aguas

residuales de los autores de Metcalf Se utilizó la técnica & Eddy en su 5ta edición, donde se basó en varios parámetros conocidos en el experimento de dimensionamiento del biorreactor de membrana, mientras que el tanque primario es más dependiente de la producción de sólidos y biomasa, los datos obtenidos ambos valores pertenecen al características de las aguas residuales bajo consideración; y finalmente la fase anóxica, que depende del volumen total de la fase aeróbica.

## ***CAPITULO 4. RESULTADOS***

### **4.1 Análisis y Discusión de resultados**

A continuación, se presenta la tabla de los resultados obtenidos en la caracterización del agua residual durante dos semanas, así como el promedio de estos valores.

Tabla 10. Resultados de Caracterización de Afluente.

| <b>Medición</b> | <b>Nitrógeno Total (mg/L)</b> | <b>Fósforo Reactivo (mg/L)</b> | <b>DQO (mg/L)</b> | <b>Alcalinidad (mL de Ácido Sulfúrico)</b> | <b>SST (mg/L)</b> | <b>Alcalinidad (mgCaCO/L)</b> |
|-----------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------|--|-------------------|-------------------------------|
| <b>1</b>        | 83                            | 23.4                           | 2594              | 7.2  | 247               | 360                           |
| <b>2</b>        | 153                           | 38.1                           | 2751              | 12.6                                       | 231               | 630                           |
| <b>3</b>        | 125                           | 51.2                           | 2397              | 11.3                                       | 228               | 565                           |
| <b>4</b>        | 109                           | 47.8                           | 2120              | 12.9                                       | 216               | 645                           |
| <b>5</b>        | 104                           | 57                             | 2861              | 16   | 205               | 800                           |
| <b>6</b>        | 117                           | 35.9                           | 2349              | 12.7                                       | 239               | 635                           |
| <b>7</b>        | 142                           | 31.7                           | 2533              | 13.3                                       | 241               | 665                           |
| <b>8</b>        | 111                           | 29.1                           | 784               | 12.4                                       | 234               | 620                           |
| <b>9</b>        | 150                           | 38.6                           | 2236              | 13.5                                       | 209               | 675                           |
| <b>10</b>       | 115                           | 47.3                           | 2543              | 11   | 200               | 550                           |
| <b>11</b>       | 119                           | 31                             | 2031              | 14.2                                       | 239               | 710                           |
| <b>12</b>       | 139                           | 51.5                           | 2347              | 15.8                                       | 223               | 790                           |
| <b>Promedio</b> | <b>122.25</b>                 | <b>40.21666667</b>             | <b>2295.5</b>     | <b>12.74166667</b>                         | <b>226</b>        | <b>637.0833333</b>            |

Ahora bien, debido a que con únicamente estos resultados no se puede definir si el afluente representa una alta carga orgánica, se debe tener una referencia con la cual comparar y definir este concepto. Dicha referencia es obtenida del capítulo 3, de la referencia bibliográfica [1], en la cual podemos observar los valores considerados como bajo, medio y alto, para los parámetros ya obtenidos en la tabla 10, en aguas residuales domésticas, representados en la siguiente tabla:

Tabla 11. Composición Típica de Aguas Residuales Domésticas y sus Rangos.

| <b>Parámetro / Unidades</b> | <b>Conc. Baja</b> | <b>Conc. Media</b> | <b>Conc. Alta</b> |
|-----------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| <b>SST mg/L</b>             | 130               | 195                | 389               |
| <b>N<sub>T</sub> mg/L</b>   | 23                | 35                 | 69                |
| <b>DQO mg/L</b>             | 339               | 508                | 1016              |
| <b>Fósforo mg/L</b>         | 2.1               | 3.2                | 6.3               |
| <b>DBO mg/L</b>             | 133               | 200                | 400               |

De esta manera, y teniendo la referencia necesaria para realizar una comparación y una aseveración adecuada, se puede afirmar que, por los valores de la DQO obtenidos en la caracterización del caudal, nuestra agua residual es efectivamente, de alta carga orgánica, pues el valor obtenido es más del doble del reportado para una concentración “alta” en la literatura.

Como el propósito es utilizar un biorreactor de membranas para el tratamiento de este caudal, se sabe que el desempeño de este tipo de equipos para cargas orgánicas tan elevadas es insuficiente para lograr la remoción requerida, por lo que, para auxiliar al MBR, se utilizará primeramente un tratamiento anaerobio, con el fin de reducir de manera significativa la carga orgánica y esta sea apta para su tratamiento mediante el biorreactor de membranas, así como una etapa anóxica intermedia, debido a que la concentración de Nitrógeno Total, se encuentra también en un valor alto, de acuerdo a la tabla 11, pues es prácticamente el doble del valor establecido como una carga de Nitrógeno Total alta.

## **4.2 Diseño del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales**

El diseño en sí, consiste en el dimensionamiento de cada una de las unidades de tratamiento para disminución de carga orgánica, es decir, del tanque anaerobio (se propone un tanque de filtro anaerobio de flujo ascendente), el tanque anóxico, y el reactor de fibras huecas inmersas, que representa el sistema aerobio

---

## Tanque Anaerobio

El diseño del tanque anaerobio está basado el método propuesto en el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Libro 29: Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.

El flujo a tratar (es decir, el flujo de entrada), es de  $1.8 \text{ m}^3/\text{d}$  (valor fijado y requerido por el lugar donde se construirá la planta, con base a su consumo diario de agua in situ).

Primeramente, dado que los cálculos se requieren en términos de DBO y se posee información de valor de la DQO, usamos esta última para terminar DBO mediante la siguiente relación:

$$DBO = DQO * 0.45$$

$$DBO = 2295.5 * 0.45 = \boxed{1032.975 \text{ g/m}^3}$$

Podemos observar que este valor de DBO, en comparación a la tabla 11, es más del doble del considerado para una denominar una alta carga orgánica, reafirmando la validez de dicha aseveración.

El Tiempo de Retención Hidráulico se fija en 1 día para esta etapa, dado que se requiere eliminar gran parte de la carga orgánica en este punto, por lo que 24 horas aseguran que se cumpla dicho propósito.

Ahora requerimos conocer la Carga Orgánica Volumétrica:

$$COV = DBO * TRH$$

$$COV = 1032.975 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} * 1\text{d} = 1032.975 \frac{\text{g}}{\text{m}^3 * \text{d}}$$

Mediante este valor de COV, es obtenido el volumen:

$$V_{An} = \frac{Q * DBO}{COV}$$

$$V_{An} = \frac{1.8 \frac{m^3}{d} * 1032.975 \frac{g}{m^3}}{1032.975 \frac{g}{m^3} * d} = 1.8 m^3$$

A este valor obtenido, se le agrega un sobrenadante para evitar derrames y fallos operativos, que en este caso es únicamente de  $0.25 m^3$ , entonces:

$$V_{An} = 1.8 m^3 + 0.25m^3 = \boxed{2.05 m^3}$$

Finalmente, se calcula la eficiencia de remoción mediante la siguiente fórmula:

$$E = 100(1 - 0.87TRH^{-0.5})$$

$$E = 100(1 - 0.87 * 24h^{-0.5}) = 82.24\%$$

Es decir, que la cantidad de DBO que entrará a la siguiente etapa será de:

$$DBO_{AnOUT} = 1032.975 - (1032.975 * 0.8224) = 183.86955g/m^3$$

## Sistema Aerobio

El diseño del sistema aerobio (es decir, el conjunto del apartado del biorreactor de fibras huecas inmersas, y la zona de preaireación) fue realizado conforme a la metodología que brinda la bibliografía perteneciente a los autores Metcalf & Eddy.

Primeramente, se requiere conocer dos datos, los cuales son:

Área Superficial de las Membranas =  $16 m^2$  (valor obtenido de Cartuchos de Membranas Comerciales).

La relación de espacio Tanque – Membranas, la cual se reporta en la bibliografía con un valor igual a  $0.015 m^3/m^2$ .

Mediante estos datos, podemos obtener el volumen del espacio designado para el biorreactor de membranas.

$$V_{MBR} = A_{SupM} * RTM$$

$$V_{MBR} = 16 \text{ m}^2 * 0.015 \text{ m}^3/\text{m}^2 = \boxed{0.24 \text{ m}^3}$$

El tiempo de Retención Hidráulico es:

$$TRH_{MBR} = \frac{V_{MBR}}{Q} = \frac{0.24 \text{ m}^3}{1.8 \text{ m}^3/\text{d}} = 0.1333 \text{ h} = 3.20 \text{ h}$$

Ahora, se obtiene la concentración de Sólidos suspendidos en el licor de mezcla para el tanque preanóxico. El valor de 8000, se refiere a los MLSS de la etapa aerobia.

$$X_{nox} = \left(\frac{6}{7}\right) * 8000 = 6857.1428 \text{ g/m}^3$$

Para los cálculos del volumen del tanque de preaireación, se realiza lo siguiente:

$$V_{preair} = \frac{(P_{X,TSS} * SRT) - (8000 * V_{MBR})}{X_{nox}}$$

Para conocer la producción de lodos en términos de sólidos suspendidos totales, es necesario especificar ciertos parámetros cinéticos que establece la bibliografía, como valores fijos. En la tabla siguiente se especifican dichos parámetros.

Tabla 12. Parámetros Cinéticos

| Parámetro | Valor    |
|-----------|----------|
| <b>Fd</b> | 0.15     |
| <b>Bh</b> | 0.10792  |
| <b>Yh</b> | 0.45     |
| <b>Yn</b> | 0.15     |
| <b>Bn</b> | 0.158274 |
| <b>μ</b>  | 5.06631  |

El Tiempo de Retención de Sólidos, se establece como 10 días, debido a que es el tiempo en el que se sacarán los lodos y por tanto, es una cuestión operativa de mano de obra directa.

Ahora, para conocer la producción de lodos, tenemos la siguiente fórmula:

$$P_{X,TSS} = \frac{P_{X,bio}}{0.85} + \frac{Q * Y_n * NO_x}{0.85 * (1 - B_n * SRT)} + Q * nbVSS + Q * (SST - SSV)$$

Entonces, para encontrar la producción de biomasa, hacemos lo siguiente:

$$P_{X,bio} = \frac{Q * Y_h * (bDQO - bsDQO)}{1 + (Bh * SRT)} + \frac{Fd * Bh * Q * Y_h * (bDQO - bsDQO) * SRT}{1 + (Bh * SRT)}$$

$$bsDQO = \frac{8 * (1 + (Bh * SRT))}{SRT * ((\mu - Bh) - 1)}$$

$$bsDQO = \frac{8 * (1 + (0.10792 * 10))}{10 * ((5.0663 - 0.10792) - 1)} = 0.3424 \text{ g/m}^3$$

Para conocer el valor de nbVSS requerimos realizar los siguientes cálculos para DQO y DBO:

$$sDBO = 183.86955 * 0.6 = 110.3217 \text{ g/m}^3$$

$$sDQO = 421.5336 * 0.6 = 245.1594 \text{ g/m}^3$$

$$bDQO = 183.86955 * 1.6 = 294.19128 \text{ g/m}^3$$

$$nbDQO = 421.5336 - 303.504019 = 114.4077 \text{ g/m}^3$$

$$nbsDQO = 252.92016 - (113.8140 * 1.6) = 68.6446 \text{ g/m}^3$$

$$nbpDQO = 421.5336 - 303.50419 - 70.8176 = 45.7630 \text{ g/m}^3$$

$$nbVSS = \frac{47.2117}{176} = 0.2600 \text{ g/m}^3$$

$$SSV = 226 * 0.8 = 180.8 \text{ g/m}^3$$

---

Una vez conocidos dichos valores, podemos obtener primeramente la producción de biomasa.

$$P_{X,bio} = \frac{1.8 * 0.45 * (294.1912 - 0.3424)}{1 + (0.10792 * 10)} + \frac{0.15 * 0.10792 * 1.8 * 0.45 * (294.1912 - 0.3424) * 10}{1 + (0.10792 * 10)}$$

$$P_{X,bio} = 278.6330 \text{ g/d}$$

Una vez encontrada la producción de biomasa, es posible encontrar el valor de producción de lodos. Aclarando que el valor de  $\text{NO}_x = 97.8 \text{ g/m}^3$ , obtenido de multiplicar  $\text{N}_T * 0.8$  (es el porcentaje de Nitrógeno amoniacal en el Nitrógeno Total).

$$P_{X,TSS} = \frac{278.6330}{0.85} + \frac{1.8 * 0.15 * 97.8}{0.85 * (1 - 0.158274 * 10)} + 1.8 * 0.2600 + 1.8 * (226 - 180.8)$$

$$P_{X,TSS} = 489.8666 \text{ g/d}$$

Finalmente, con todos los datos necesarios ya conocidos, se procede a calcular el volumen del tanque de preaireación.

$$V_{preair} = \frac{(489.8666 * 10) - (8000 * 0.24)}{6857.1428}$$

$$V_{preair} = 0.4343 \text{ m}^3$$

Con el volumen del tanque de preaireación, en conjunto con el volumen del biorreactor, se puede calcular el volumen total del sistema aerobio, de la siguiente forma:

$$V_{Tair} = V_{preair} + V_{MBR}$$

---

$$V_{Tair} = 0.4343 + 0.24$$

$$V_{Tair} = 0.6743 \text{ m}^3$$

Para los biorreactores de membranas, la bibliografía reporta eficiencias de remoción de entre 85 y 90% de la DBO, por lo que la carga orgánica al finalizar el tratamiento sería:

$$DBO_{OUT} = 183.86955 - (183.86955 * 0.85) = \boxed{27.5804 \text{ g/m}^3}$$

Entonces, si realizamos un balance de materia, únicamente con la DBO, tenemos:

$$1032.975 \frac{mg}{L} DBO = 27.5804 \frac{mg}{L} DBO$$

El lado izquierdo de la expresión representa la entrada al sistema, desde la etapa anaerobia, y la parte de la derecha, representa la salida del biorreactor de membranas.

Entonces la **eficiencia de remoción total del proceso** es:

$$E = \frac{1032.975 \frac{mg}{L} - 27.5804 \text{ mg/L}}{1032.975 \text{ mg/L}} \times 100 = \boxed{97.33\%}$$

Si comparamos el valor obtenido al final de DBO, con lo estipulado en la NOM-003-SEMARNAT-1997, podemos observar que, para el propósito principal del efluente, que es un reúso de contacto indirecto, se está dentro de valores de la norma, cumpliendo el objetivo del diseño de este sistema de tratamiento de aguas residuales.

---

## Tanque Anóxico

El diseño del tanque anóxico se encuentra como posterior al diseño del sistema aerobio en la metodología de Metcalf & Eddy.

El volumen del tanque anóxico se encuentra de la siguiente manera:

$$V_{Anox} = 0.2 * (V_{preair} + V_{MBR})$$

$$V_{Anox} = 0.2 * (0.4343 + 0.24)$$

$$V_{Anox} = 0.1348 \text{ m}^3$$

Para calcular la cantidad de nitrógeno removido en la etapa anóxica, es necesario realizar algunos cálculos para obtener algunas variables de interés en este punto, empezando por la concentración de biomasa activa en el tanque de aireación.

$$P_{x,b} = \frac{Q * Yh * (bDQO - bsDQO)}{1 + (Bh * SRT)} = \frac{1.8 * 0.45 * (294.1912 - 0.3424)}{1 + (0.10792 * 10)} = 114.4452 \text{ g/d}$$

$$\text{La fracción } Xb = \frac{P_{x,b}}{P_{X,TSS}} = \frac{114.4452}{489.8666} = 0.2336$$

$$X_{pre,b} = Xb * X_{nox} = 0.2336 * 6857.1429 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 1602.0021 \text{ g/m}^3$$

Ahora, obtenemos la tasa de alimentación de masa para esta etapa.

$$\frac{F}{M} = \frac{Q * bDQO}{V_{nox} * X_{pre,b}} = \frac{1.8 * 294.1912}{6857.1429 * 1602.0021} = 2.4507$$

---

La Tasa de Denitrificación está sujeta a los valores de F/M, teniendo en cuenta lo siguiente:

Para  $F/M > 0.50$ ,  $SDNR = b_0 + b_1 [\ln(F/M)]$

Para  $F/M < 0.50$ ,  $SDNR = 0.24(F/M)$

Los valores de  $b_0$  y  $b_1$  vienen dados en una tabla en el capítulo 8 de la primera bibliografía [1].

Entonces la  $SDNR_{20}$  es:

$$SDNR_{20} = 0.235 + 0.141 * \left( LN \left( \frac{F}{M} \right) \right) = 0.36139$$

Usando el factor de corrección de temperatura tenemos lo siguiente.

$$SDNR_{17.5} = SDNR_{20} * ((1.026)^{-2.5}) = 0.3389$$

Y finalmente, aplicando una corrección por el reciclado:

$$SDNR_{adj} = SDNR_{17.5} - \left( 0.029 * LN \left( \frac{F}{M} \right) \right) - 0.012 = 0.3009$$

Así, finalmente tenemos que la **remoción de Nitrógeno** en el tanque anóxico es:

$$Remoción NOx = V_{Anox} * SDNR_{adj} * X_{pre,b} = 0.1348 * 0.3009 * 1602.0021 = 65.0242 \text{ g/d}$$

Al sustraer este valor, del promedio reportado para Nitrógeno Total en la tabla 10, podemos observar que el contaminante de Nitrógeno Total, será reducido de la siguiente manera:

$$NOx \text{ Final} = 122.25 - 65.0242 = 57.2258 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

Comparando el valor obtenido de Nitrógeno total en el efluente, al compararlo con el valor de la NOM-001-

---

SEMARNAT-1996, se prevé que este sistema tenga una remoción de nitrógeno total, tal que entre incluso en la Normatividad de la NOM-001-SEMARNAT-1997, por lo que se puede decir, que la etapa anóxica está cumpliendo su propósito.

Como se puede observar de los volúmenes obtenidos para cada una de las etapas, se obtiene un beneficio en la utilización de un tren de tratamiento de esta clase, el cual es la optimización de espacio ocupado por toda la planta para la depuración del agua residual, es decir, que se tratará un agua contaminada de alta carga orgánica en un espacio menor al que se usaría con una planta de tratamiento convencional. Esto puede variar con el aumento del caudal a tratar, sin embargo, este arreglo ofrecerá siempre la ventaja de un menor espacio a utilizar en comparación con las plantas de tratamiento comunes.

Finalmente, se puede observar que el tren de tratamiento propuesto teóricamente es viable, y su capacidad de remoción puede ser puesta a prueba con la aplicación (construcción) de dicho sistema en el lugar estudiado. Es importante recalcar que las ventajas que trae el uso de la tecnología de membranas para el tratamiento de aguas residuales es visible en el diseño del sistema de tratamiento, ya que obtenemos un uso de espacio menor al de los tratamientos convencionales, no requerimos de un clarificador secundario, y logramos eficiencias de remoción altas, lo suficiente para tratar un caudal de alta carga orgánica y llevarlo al cumplimiento de la Normatividad Oficial Mexicana. Sin embargo, es también relevante comentar acerca de las desventajas que puede traer el uso de esta tecnología, como lo es el costo de mantenimiento e instalación del equipo, así como el consumo energético que requiere su funcionamiento continuo.

---

## CAPITULO 5. CONCLUSIONES

Al examinar los resultados conseguidos en este trabajo de averiguación, tenemos la posibilidad de asegurar que se alcanza con el objetivo del proyecto, concluyendo lo próximo:

La remoción preciada a lograrse con este sistema de procedimiento cumple con los parámetros máximos permisibles establecidos en las Reglas Oficiales Mexicanas, dejando margen a acortar los tiempos de retención hidráulica en determinadas piezas del proceso, puesto que esto puede optimizar el proceso manteniendo el objetivo primordial de continuar bajo el cumplimiento de las reglas.

De esta forma se enseñó que un ferrocarril de procedimiento aplicando un reactor de un biorreactor de membranas, consigue minimizar la alta carga orgánica presente en varios afluentes de aguas residuales, cumpliendo con los estándares establecidos por las reglas mexicanas.

### **Observaciones:**

La obra a escala de un sistema como el que aquí se ofrece, para el procedimiento de aguas residuales en sitios donde se crean altas cargas orgánicas y que no cuentan con sistemas de alcantarillado, es fiable que sirva para resolver esa problemática, realizando uso de este entendimiento para su adecuada utilización, e inclusive, para su mejora.

---

## REFERENCIAS

- Aileen N.L., N. Albert S. Kim (2007). A mini-review of modeling studies on membrane bioreactor (MBR) treatment for municipal wastewaters. *Desalination* 212. 261–281.
- Arévalo J., Garralón G., Plaza F., Moreno B., Pérez J., Gómez M.A (2009). Wastewater reuse after treatment by tertiary ultrafiltration and a membrane bioreactor (MBR): a comparative study. *Desalination* 243, 32–41.
- Aya, H. (1994). Modular membranes for self-contained reuse system. *Water Qual. Intl.* 4, 21–22.
- Buisson H., Cote P., Praderie M., Paillard H. (1998). The use of immersed membranes for upgrading wastewater treatment plants. *Water Science and Technology*, Volume 37, Issue 9, Pages 89-95.
- Chiemchaisri C., Wong Y.K., Urase T., Yamamoto K. (1993). Organic stabilisation and nitrogen removal in a membrane separation bioreactor for domestic wastewater treatment. *Filtration & Separation*, Volume 30, Issue 3, , Pages 247-252, 240.
- Rosenberger S. and Kraume M. (2002). Filterability of activated sludge in membrane bioreactors. *Desalination* 151. 195-200.
- Stephenson, T.; Judd, S. and Jefferson B, Brindle K. (2002). *Membrane bioreactor for wastewater treatment*, edit. IWAI Publishing, Cornwall, U.K.
- T. Stephenson, B. Jefferson \*, A. Laine, S. Parsons , S. Judd (1999). Technologies for domestic wastewater recycling. *Urban Water* 1, 285-292.
- Wang X-M., Li X-Y., Huang X (2007). Membrane fouling in a submerged membrane bioreactor (SMBR): Characterisation of the sludge cake and its high filtration resistance. *Separation and Purification Technology*, Volume 52, Issue 3, January, Pages 439-445.
- Yang, W.; Cicek, N. and Ilg, J. (2006). State-of-art of membrane bioreactors: Worldwide research and commercial applications in North America, *Journal of membrane Science*, 270 201-211.

- 
- Yoon, S.H.; Kim, H.S.; Yeom, I.T. (2004) The optimum operational condition of membrane bioreactor (MBR): Cost estimation and sludge treatment. *Water Research* 38. 37-46.