



**BENEMÉRITA Y CENTENARIA UNIVERSIDAD
MICHOCANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“DISEÑO DE UN BIO-REACTOR DE FIBRAS HUECAS
INMERSAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE ALTA CARGA ORGÁNICA, PARA
CUMPLIMIENTO DE LA NOM-003-SEMARNAT-1997”**

TESIS presentada por:

VÍCTOR JESÚS SAGRERO MORA

Para obtener el grado de:

INGENIERO QUÍMICO

DIRECCIÓN DE TESIS:

DR. RAFAEL HUIRACHE ACUÑA

Morelia, Michoacán

Agosto 2020

Resumen

DISEÑO DE UN BIO-REACTOR DE FIBRAS HUECAS INMERSAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE ALTA CARGA ORGÁNICA, PARA CUMPLIMIENTO DE LA NOM-003.SEMARNAT-1997

Por

Víctor Jesús Sagrero Mora

Agosto 2020

Pasante de Ingeniería Química

Dirigida por: Dr. Rafael Huirache Acuña

La contaminación de las aguas es uno de los factores más importantes que rompen la armonía entre el hombre y su medio, no sólo de forma inmediata sino, también, a mediano y largo plazo.

Todos los contaminantes contenidos en las aguas residuales, causarían serios problemas ambientales si se incorporasen directamente a un curso de agua no contaminado. Por ello es necesario que sean tratadas antes de su vertido, con el fin de rebajar lo más posible su carga contaminante, y que estén dentro de los límites establecidos por las Normas Mexicanas en materia ambiental.

Hoy en día existe una gran diversidad en cuanto a sistemas de tratamiento de aguas residuales se refiere, algunos son muy comunes debido a su efectividad y sencillez de aplicación, sin embargo, cada efluente de aguas residuales presenta características distintas atribuibles al entorno en el que se encuentran.

En este trabajo en particular, el interés fue proponer y estudiar un diseño de bio-reactor de fibras huecas inmersas, acompañado de un sistema de tratamiento para aguas residuales de alta carga orgánica.

Para poder proponer de manera certera dicho tren de tratamiento, fue necesario primeramente realizar un muestreo diario para caracterizar adecuadamente el agua residual a tratar. Para esto, se procedió a hacer pruebas para obtener valores de Demanda Química de Oxígeno, Nitrógeno Total, Fósforo Reactivo, Alcalinidad, pH y Sólidos Suspendidos Totales.

Una vez hecha la caracterización del agua residual, se propuso un sistema conformado de la siguiente manera: Un tanque anaerobio empacado de flujo ascendente; posteriormente un espacio anóxico, luego un tanque de preareamiento, finalizando con el biorreactor de fibras huecas inmersas.

De este diseño obtenemos ciertas estimaciones de remoción final de contaminantes, de manera concreta, de carga orgánica. Dichas estimaciones cumplen con los valores permisibles por las Normas Oficiales Mexicanas de la SEMARNAT.

Palabras Clave: Problemas Ambientales, Contaminación, Caracterización, Estimaciones, Efectividad.

Abstract

DESIGN OF AN IMMERSED HOLLOW FIBER BIO-REACTOR FOR THE TREATMENT OF HIGH ORGANIC LOAD WASTEWATER, IN COMPLIANCE WITH NOM-003.SEMARNAT-1997

By

Victor Jesus Sagrero Mora

August 2020

Chemical Engineering Intern

Directed by: Dr. Rafael Huirache Acuña

Water pollution is one of the most important factors that break the harmony between man and his environment, not only immediately but also in the medium and long term.

All the pollutants contained in wastewater would cause serious environmental problems if they were directly incorporated into an unpolluted watercourse. Therefore, it is necessary that they are treated before their discharge, in order to reduce their contaminating load as much as possible, and that they are within the limits established by the Mexican Standards on environmental matters.

Today there is a great diversity in terms of wastewater treatment systems, some are very common due to their effectiveness and simplicity of application, however, each wastewater effluent has different characteristics attributable to the environment in which it is found.

In this particular work, the interest was to propose and study a hollow fiber immersed bio-reactor design, accompanied by a treatment system for high organic load wastewater.

In order to accurately propose such a treatment train, it was first necessary to perform a daily sampling to adequately characterize the wastewater to be treated. For this, tests were made to obtain values of Chemical Oxygen Demand, Total Nitrogen, Reactive Phosphorus, Alkalinity, pH and Total Suspended Solids.

Once the waste water was characterized, a system was proposed as follows: A hopper for solids separation, followed by an anaerobic packaged tank with upward flow; then an anoxic space, then a pre-reactor tank, ending with the immersed hollow fiber bioreactor.

From this design we obtain certain estimates of final contaminant removal, specifically, of organic load. These estimates comply with the permissible values by the Mexican Official Standards of the SEMARNAT.

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada a:

A mis queridos padres María Elena y Marco Antonio, quienes me han apoyado incondicionalmente y con su comprensión, cariño y paciencia me han permitido llegar hasta donde estoy hoy día, pues han inculcado en mí la perseverancia y responsabilidad para lograr mis objetivos.

A mis hermanos Marco Antonio y Luis Javier, por brindarme el ejemplo de constancia y dedicación para lograr formarme en todo aspecto, tanto personal como profesionalmente, y quienes, a pesar de las adversidades, han confiado y creído en mí en todo momento.

Finalmente, quiero dedicar esta tesis a mis amigos Francisco y Alfonso, por su apoyo en todo momento, por su valiosa amistad, y por confiar en mí persona, sé que ellos estarán ahí para mí en las buenas y en las malas, así como yo estaré siempre para ellos, con la mejor de las actitudes.

Gracias, de todo corazón.

Índice

RESUMEN.....	IV
DEDICATORIA	VII
ÍNDICE.....	VIII
RELACIÓN DE TABLAS Y FIGURAS	X
NOMENCLATURA.....	XI
AGRADECIMIENTOS.....	XII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1 Generalidades	14
1.2 Justificación	15
1.3 Objetivo general	16
1.4 Objetivos específicos	16
1.5 Hipotesis	16
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	17
2.1 Contaminación del agua.....	17
2.2 Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales.....	18
2.2.1 Pretratamiento.....	18
2.2.2 Tratamiento Primario.....	19
2.2.3 Tratamiento Secundario.....	19
2.2.4 Tratamiento Terciario.....	20
2.3 Caracterización de Aguas Residuales.....	21
2.4 Parámetros de Operación de los Reactores Biológicos	21
2.5 Cinética Bacteriana	23
2.6 Procesos Biológicos de Tipo Anaerobio	23

2.6.1 Reactores de Biomasa Tipo Granular	25
2.6.2 Reactores de Biopelícula.	26
2.7 Sistemas de Tratamiento Anóxicos	27
2.8 Procesos Biológicos de Tipo Aerobio.....	28
2.8.1 Procesos de Cultivo en Suspensión.	29
2.8.2 Procesos de Cultivo Fijo.	30
2.9 Biorreactores de Membrana	31
2.10 Normas Oficiales Mexicanas SEMARNAT	32
2.10.1 NOM-001-SEMARNAT-1996.	32
2.10.2 NOM-003-SEMARNAT-1997.	33
CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	35
3.1.1 Caracterización del Agua Residual	35
3.1.2 Diseño del Sistema de Tratamiento de aguas residuales.....	35
CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....	36
4.1 Caracterización del Agua Residual.....	36
4.2 Diseño del Sistema de Tratamiento de aguas residuales	36
CONCLUSIONES.....	38
OBSERVACIONES.....	38
BIBLIOGRAFÍA.....	39
APÉNDICE A.....	40
Metodología de Caracterización de Aguas Residuales	40

Relación de Tablas y Figuras

<i>Figura 1.</i>	<i>Tanque de Sedimentación.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.</i>	<i>Diagrama simple de Proceso de Lodos Activados.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3.</i>	<i>Ventajas y Desventajas de los Procesos Biológicos de Tipo Anaerobio.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 4.</i>	<i>Metabolismo Anaerobio.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 5.</i>	<i>Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 6.</i>	<i>Reactor de Filtro Anaerobio.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 7.</i>	<i>Proceso de Lodos Activados</i>	<i>31</i>
<i>Figura 8.</i>	<i>Reactor de Filtro Percolador</i>	<i>32</i>
<i>Figura 9.</i>	<i>Biorreactor de Membranas Sumergidas.</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 1.</i>	<i>Límites Máximos Permisibles de Contaminantes Básicos según la NOM-001-SEMARNAT-1996</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 2.</i>	<i>Límites Máximos Permisibles de Contaminantes según la NOM-003-SEMARNAT-1997.</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 3.</i>	<i>Resultados de Caracterización de Afluente.</i>	<i>37</i>

Nomenclatura

DQO	Demanda Química de Oxígeno
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SSV	Sólidos Suspendidos Volátiles
N_T	Nitrógeno Total
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
RAS	Recirculación de Lodos Activados
WAS	Purga de Lodos Activados
MLVSS	Sólidos Suspendidos Volátiles en Suspensión en el Licor de la Mezcla

Agradecimientos

Agradezco a mi Benemérita y Centenaria Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, y a la Facultad de Ingeniería Química, especialmente a las Doctoras Ana María y María Elena Núñez Gaytán, así como al Dr. Roberto Guerra González, y al Dr. Rafael Huirache Acuña, quienes más allá de las enseñanzas que me dejaron en el salón de clases, me ayudaron a crecer personal y profesionalmente, por ello les reconozco su enorme dedicación y agradezco su apoyo, su amistad y su paciencia para con mi persona.

También, quiero expresar mi eterna gratitud con mi familia y amigos, quienes en ningún momento me desampararon, y fueron parte fundamental de esta etapa, dejándome una grata experiencia e impulsándome siempre a salir adelante.

A todos ustedes, les llevo en el corazón, y les doy gracias, hoy y siempre.

1.- Introducción

1.1. Generalidades

El tratamiento de aguas residuales ha sido siempre una necesidad para el hombre, debido a que nuestras actividades productivas interfieren en el ciclo natural del agua, además de que nuestra mera existencia, por los procesos biológicos intrínsecos a nuestro organismo, contribuyen a la contaminación del agua disponible en el ecosistema.

Los seres humanos han almacenado y distribuido el agua durante siglos. Hace aproximadamente 7000 años en Jericó (Israel) el agua almacenada en los pozos se utilizaba como fuente de recursos de agua, además se empezaron a desarrollar los sistemas de transporte y distribución del agua. Este transporte se realizaba mediante canales sencillos, excavados en la arena o las rocas y más tarde se comenzarían a utilizar tubos huecos.

Alrededor del año 3000 A.C., la ciudad de Mohenjo-Daro (Pakistán) utilizaba instalaciones de distribución y necesitaba un suministro de agua muy grande. En la antigua Grecia el agua de escorrentía, agua de pozos y agua de lluvia eran utilizadas desde épocas muy tempranas. Debido al crecimiento de la población se vieron obligados al almacenamiento y distribución (mediante la construcción de una red de distribución) del agua. El agua utilizada se retiraba mediante sistemas de aguas residuales, a la vez que el agua de lluvia. Los griegos fueron de los primeros en tener interés en la calidad del agua. Ellos utilizaban embalses de aireación para la purificación del agua.

Los romanos fueron los mayores arquitectos en construcciones de redes de distribución de agua que ha existido a lo largo de la historia. Los romanos construyeron presas para el almacenamiento y retención artificial del agua. El sistema de tratamiento por aireación se utilizaba como método de purificación. El agua de mejor calidad y por lo tanto más popular era el agua proveniente de las montañas. En los sistemas de tuberías en las ciudades utilizaban cemento, roca, bronce, plata, madera y plomo. Las fuentes de agua se protegían de contaminantes externos.

Después de la caída del imperio Romano, los acueductos se dejaron de utilizar. Desde el año 500 al 1500 D.C. hubo poco desarrollo en relación con los sistemas de tratamiento del agua. Durante la edad media se manifestaron gran cantidad de problemas de higiene en el agua y los sistemas de distribución de plomo, porque los residuos y excrementos se vertían directamente a las aguas. La

gente que bebía estas aguas enfermaba y moría. Para evitarlo se utilizaba agua existente fuera de las ciudades no afectada por la contaminación. Esta agua se llevaba a la ciudad mediante los llamados portadores. El primer sistema de suministro de agua potable a una ciudad completa fue construido en Paisley, Escocia, alrededor del año 1804 por John Gibb. En tres años se comenzó a transportar agua filtrada a la ciudad de Glasgow. En 1806 en París empieza a funcionar la mayor planta de tratamiento de agua. El agua sedimentaba durante 12 horas antes de su filtración. Los filtros consistían en arena, carbón y su capacidad era de seis horas. En 1827 el inglés James Simplón construyó un filtro de arena para la purificación del agua potable. Hoy en día todavía se considera el primer sistema efectivo utilizado con fines de salud pública.

Sin embargo, hace algunas décadas, se innovó con un tipo de biorreactores cuya tecnología para la remoción de contaminantes en aguas residuales era muy eficiente, y ocupaba un menor espacio que los tanques utilizados en esos tiempos, éstos utilizaban membranas poliméricas; este tipo de biorreactores es conocido como Biorreactores con Membranas, o por sus siglas en inglés “MBR”.

Hoy en día, este tipo de tecnologías se siguen usando y mejorando, pues han demostrado ser muy eficientes por sí solos en lo que al tratamiento de aguas residuales para reúso se refiere.

1.2. Justificación

Con el propósito de enfrentar las nuevas problemáticas en cuanto a la disposición de aguas residuales en sitios alejados de los centros urbanos, 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.

Generalmente, para resolver estos problemas se utilizan fosas sépticas seguidas de pozos de absorción, lo cual deriva en la contaminación de mantos acuíferos, además de que, al no ser un sistema de tratamiento convencional, suelen colapsar y requerir mantenimientos mayores, lo que los convierte en sistemas inviables.

Es por ello que, para atender a este tipo de situaciones, es conveniente colocar una planta para el tratamiento del agua residual generada en dichas locaciones.

En la actualidad existen alternativas tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales que permiten su reutilización posterior al saneamiento, siendo una de ellas los Bio-Reactores de Membranas, también llamados MBR (por su nombre en inglés Membrane Bio-Reactor). Este tipo de reactores están compuestos de dos partes principales, las cuales son el Reactor Biológico, el cual es el responsable de la degradación de los compuestos presentes en el agua residual; y el Módulo de Membranas, el cual se encarga de la separación física de los lodos activados y el agua, por medio de la ultrafiltración. Dichos Bio-Reactores son convencionalmente utilizados en sistemas aerobios, los cuales manejan bajas cargas orgánicas (menor a 500mg/L de DBO), por lo que, para su implementación en los casos comentados anteriormente, requieren de un sistema de tratamiento previo para la reducción de la carga orgánica en el agua residual, antes de ser suministrada a un MBR.

1.3. Objetivo General

Diseñar una planta de tratamiento para aguas residuales de alta carga orgánica, con finalidad de reúso en una locación carente de sistema de drenaje.

1.4. Objetivos Específicos

- Caracterizar el agua residual producida en una industria que no cuenta con sistema de drenaje.
- Diseñar una planta de tratamiento para el agua residual producida en dicha locación.

1.5. Hipótesis

Haciendo énfasis en tratar específicamente efluentes de alta carga orgánica, se pretende diseñar un sistema de tratamiento para este tipo de aguas residuales, mediante el uso de un biorreactor de fibras huecas inmersas obteniendo la remoción necesaria para cumplir con la NOM-003-SEMARNAT-1997. Por tanto, se debe caracterizar un efluente para poder dimensionar los equipos necesarios para este tren de tratamiento, así como los requerimientos de servicios necesarios para el funcionamiento de este sistema.

2. Marco Teórico

2.1 Contaminación del agua

La vida en la Tierra no sería posible sin el agua, pues es éste el elemento natural más abundante en nuestro planeta. En ella se generó la vida en los océanos primitivos, y es un componente esencial para todos los organismos vivos que existen.

Sin embargo, la contaminación de ésta se ha vuelto un problema cada vez más pronunciado para el ser humano, pues el continuo crecimiento y desarrollo de las civilizaciones ha dejado como consecuencia una mayor demanda de agua limpia para su uso y, por lo tanto, mayor cantidad de agua contaminada.

Así pues, la OMS define el agua contaminada como “aquella cuya composición haya sido modificada de modo que no reúna las condiciones para el uso que se le hubiera destinado en su estado natural”.

Si bien el agua puede ser contaminada por factores naturales, como lo son los restos de animales muertos en los cauces o depósitos de agua, la filtración de componentes de la superficie a mantos acuíferos, o el arrastre de suciedad y otros componentes provocado por la lluvia, así como contaminantes atmosféricos; hoy en día, predominan los factores antropogénicos, es decir, aquellos provocados por la mano del hombre, que bien pueden ser de distintos orígenes, como:

- Origen doméstico: aquellas que provienen de núcleos urbanos, provocadas por actividades domésticas cotidianas como alimentos, deyecciones, basura, productos de limpieza, etc.
- Origen agrícola - ganadero: son el resultado de riego, limpieza ganadera, abono, excremento animal y fertilizantes.
- Origen industrial: provenientes de toda actividad industrial, tenemos como ejemplo los desechos en industrias textiles, de alimentos, alimentarias, también el lavado de gases en la industria metalúrgica, las fibras en papeleras, entre otros.

Para tratar este problema de contaminación, es que se diseñan e implementan los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

2.2 Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales

Un sistema de tratamiento de aguas residuales puede definirse como una serie de procesos físicos, químicos y biológicos a los que se somete un agua de carácter residual con el fin de eliminar todos los contaminantes, permitiendo así su reutilización en distintas actividades, o bien, para reincorporarla a los cauces naturales.

En lo que respecta al proceso completo de tratamiento de aguas residuales, éste puede dividirse en 4 partes, las cuales son:

- Pretratamiento.
- Tratamiento Primario.
- Tratamiento Secundario.
- Tratamiento Terciario.

Cada uno de estas etapas juega un papel específico en el tratamiento de aguas residuales, y los equipos que se engloban en cada etapa se eligen y diseñan dependiendo de los contaminantes presentes que se desean remover del flujo a tratar. En las siguientes secciones, se abordan los objetivos de cada etapa, así como los equipos más comunes en cada una de ellas.

2.2.1 Pretratamiento

“Los pretratamientos de aguas residuales implican la reducción de sólidos en suspensión o el acondicionamiento de las aguas residuales para su descarga bien en los receptores o para pasar a un tratamiento secundario”. [2]

Entendemos entonces, que estos sistemas son principalmente equipos para tratamiento físico únicamente, pues en éstos no se involucran procesos químicos ni biológicos. Los equipos más comunes en cuanto a esta etapa del proceso, son los sistemas de rejas o tamices (los cuales buscan separar partículas de gran tamaño como plásticos), desarenadores (para eliminar arena presente en el flujo de entrada) y sistemas de eliminación de grasas (necesarios para remover grasas y aceites).

Una vez que el agua pasa por el o los equipos correspondientes, ésta sigue con el proceso hacia el equipo de tratamiento primario necesario.

2.2.2 Tratamiento Primario

El propósito principal del tratamiento primario, es dejar al agua residual en cuestión en condiciones aptas para su paso al tratamiento secundario. Generalmente, los equipos más utilizados en esta etapa del proceso, son los sedimentadores o clarificadores, mediante los cuales se eliminan sólidos en suspensión por medio de la decantación por gravedad.

Sin embargo, dentro de este tipo de tratamientos, también podemos encontrar tanques de neutralización (si el pH del agua no es el indicado para su paso al tratamiento secundario), y tanques de homogeneización (cuya función es homogeneizar el flujo entrante tanto en caudal como en composición), asegurando así que no existan fallos operativos en las siguientes etapas del tren de tratamiento.

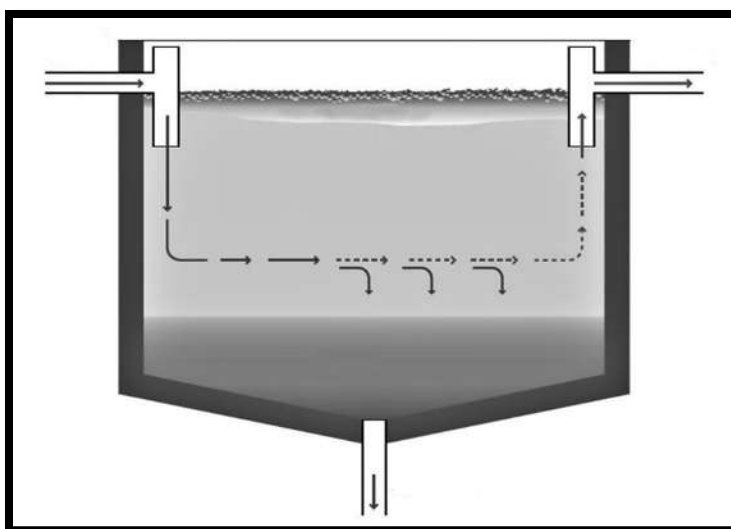


Figura 1. Tanque de Sedimentación

2.2.3 Tratamiento Secundario

Esta etapa es la central en todo el proceso de tratamiento de aguas residuales, pues es en esta etapa donde se realiza la mayor remoción de contaminantes.

El tratamiento secundario de aguas residuales constituye una serie de procesos de naturaleza biológica que tienen en común la utilización de microorganismos para llevar a cabo la eliminación de materia orgánica.

En el tratamiento secundario de aguas residuales se pueden hacer dos grandes distinciones en cuanto al tipo de proceso, siendo estos aerobios y anaerobios, los cuales, a su vez, engloban ciertas diferencias como son el uso de un lecho fijo, o un cultivo móvil.

Posteriormente se profundizará en los procesos biológicos tanto de tipo aerobio como anaerobio, sin embargo, cabe resaltar que el proceso secundario más común es el llamado de “lodos activados”.

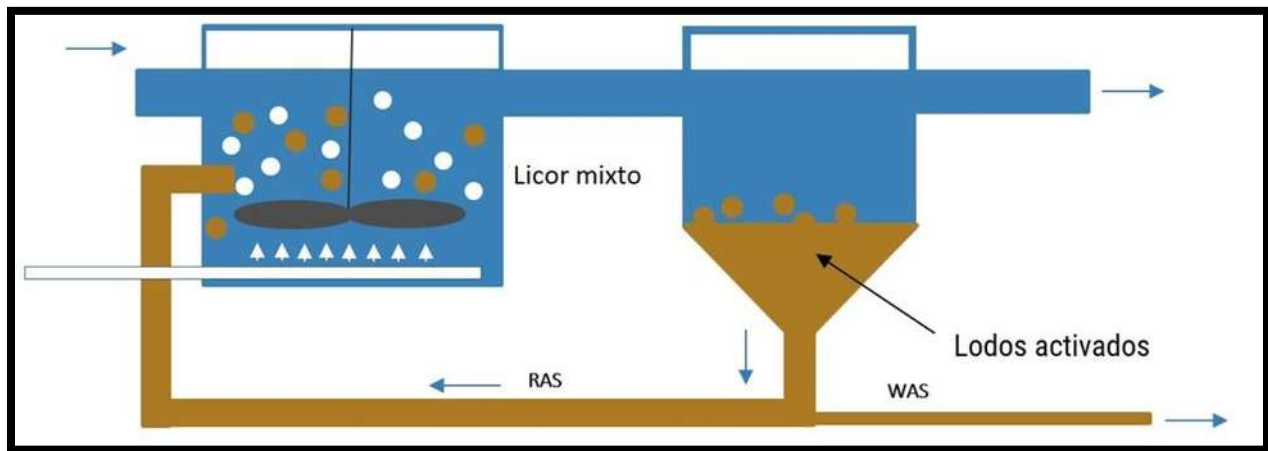


Figura 2. Diagrama simple de Proceso de Lodos Activados.

2.2.4 Tratamiento Terciario

En un tratamiento terciario de aguas residuales, la finalidad es eliminar carga orgánica residual, algunos contaminantes remanentes, y elevar la calidad del agua para llevarla a los estándares deseados al finalizar el proceso.

Algunos procesos empleados como tratamientos terciarios son las resinas de intercambio iónico, la adsorción en carbón activado, y ósmosis inversa.

Este tipo de etapas no son siempre implementadas en los trenes de tratamiento, pues generalmente, los parámetros de contaminantes son reducidos únicamente para fines que no involucran el consumo del agua tratada de manera directa por el ser humano, por lo que se diseña y construye el sistema de tratamiento hasta una etapa secundaria, donde se cumple con estos parámetros.

2.3 Caracterización de Aguas Residuales

El conocimiento de las características fisicoquímicas y biológicas de las aguas residuales es importante no sólo para cumplir con las exigencias de la entidad reguladora o pre seleccionar métodos de tratamiento posibles, sino también para optimizar los procesos industriales.

Es por esto que se deben conocer ciertos parámetros específicos cuyos valores nos indican el grado de contaminación existente en el caudal a tratar, además de brindarnos información acerca de elementos o compuestos presentes en el agua, y a partir de estos, se pueden tomar decisiones respecto a los equipos necesarios para el tratamiento del agua residual en cuestión.

Los parámetros que deberán ser analizados, a parte de los generales como pH y conductividad, serán los que den idea del contenido de materia orgánica (usualmente relacionada con la Demanda Química de Oxígeno y Demanda Bioquímica de Oxígeno), nutrientes (nitrógeno y fósforo), sólidos en suspensión, alguno relacionado con la toxicidad de las aguas residuales en relación a los microorganismos, además de los más específicos y relacionados con el tipo de actividad que genera el efluente (metales, tensoactivos, sulfatos, cianuros, etc.).

2.4 Parámetros de Operación de los Reactores Biológicos

Como bien se mencionó con anterioridad, el tratamiento secundario es parte central de los procesos de tratamiento de aguas residuales, por lo que los reactores biológicos propios de estas etapas deben ser monitoreados para su correcto desempeño, mediante ciertos parámetros. Estos parámetros de operación son básicamente las variables necesarias para controlar y evaluar el funcionamiento de los reactores biológicos.

Parámetros Fisicoquímicos:

En esta parte no se toma en cuenta Color, Grasas y Aceites, etc., porque para esta etapa del proceso, se supone dichos contaminantes debieron ser removidos.

Carga Orgánica:

Se pone tanto DQO como DBO porque ambas dan idea del nivel de contaminación y la carga orgánica presente en el agua residual. Sin embargo, la DBO es la que mas se utiliza tanto para

diseño como para llevar control del agua, pues nos da idea de la materia orgánica susceptible a ser consumida u oxidada por medios biológicos.

Cargas de nutrientes:

Los coliformes tradicionalmente se los ha considerado como indicadores de contaminación fecal en el control de calidad del agua destinada al consumo humano en razón de que, en los medios acuáticos, los coliformes son más resistentes que las bacterias patógenas intestinales y porque su origen es principalmente fecal. Por tanto, su ausencia indica que el agua es bacteriológicamente segura.

Tiempo de Retención Celular:

El tiempo de retención celular es el número de días que las bacterias o la masa de bacterias permanecen en el tren de tratamiento secundario. El TRC está controlado por la cantidad de purga de lodos activados.

Tasas de Recirculación:

Este es la tasa de flujo en el que una parte de los lodos activados se devuelve al tanque de aireación para mantener el nivel de microorganismos.

Generalmente depende del caudal más que otra cosa, los sólidos suspendidos en el licor mezclado están técnicamente en función de este caudal, pues la cantidad de lodos (y por ende de sólidos en el licor), depende de la cantidad de contaminante a remover, y a su vez, del caudal diario que se piense tratar.

Es importante tener bien presente esta tasa de recirculación de lodos pues permite mantener un crecimiento constante de bacterias en dichos lodos, además de evitar la acumulación en un solo punto del proceso (ayudado por las purgas).

Tiempo de Retención Hidráulico:

El Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) es el tiempo que una unidad de fluido permanece en un recipiente, es decir, el tiempo que el líquido que entra en el recipiente tarda en salir del mismo.

2.5. Cinética Bacteriana

En el proceso de tratamiento biológico de efluentes líquidos, los microorganismos utilizan el agua residual como medio de cultivo para sintetizar material celular y suministrar energía para la síntesis.

La materia orgánica presente en el agua residual que permite el crecimiento de estos microorganismos no tiene un consumo lineal y específico, además, depende de algunos factores físicoquímicos.

La ecuación de Monod es un modelo matemático para el crecimiento de microorganismos. Lleva el nombre de Jacques Monod, quien propuso usar una ecuación de esta forma para relacionar las tasas de crecimiento microbiano en un ambiente acuoso con la concentración de un nutriente limitante.

$$\mu = \frac{\mu_m S}{K_s + S}$$

Ecuación 2.1 Ecuación de Monod.

Dónde:

μ =Velocidad específica de crecimiento
 μ_m =máxima velocidad de crecimiento
 K_s Constante promedio de velocidad. Concentración de sustrato a la mitad del máximo de velocidad de crecimiento. masa/unidad de volumen.
 S =Concentración del sustrato. masa/unidad de volumen

2.6 Procesos Biológicos de tipo Anaerobio

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 CO₂, 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.

Los datos experimentales en este tipo de sistemas demuestran que el tiempo de residencia requerido varía de 2 a 20 días, pero dependiendo de la cantidad de carga orgánica a tratar, esto puede extenderse aún más. El nivel óptimo de pH va de 6.8 a 7.4 para su correcto funcionamiento.

Este tipo de sistemas poseen ciertas ventajas y desventajas en comparación con los procesos biológicos de tipo aerobio, las cuales se enuncian en el siguiente gráfico:

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• No emplea equipo de aireación• Produce menos biomasa• Permite operar a cargas orgánicas mayores• Producción de metano	<ul style="list-style-type: none">• Mayores tiempos de residencia• Requiere mayores temperaturas• Se dificulta su sedimentación en clarificador• Operación mas compleja en general

Figura 3. Ventajas y Desventajas de los Procesos Biológicos de Tipo Anaerobio.

El metabolismo anaerobio de la materia orgánica se representa en el diagrama siguiente:

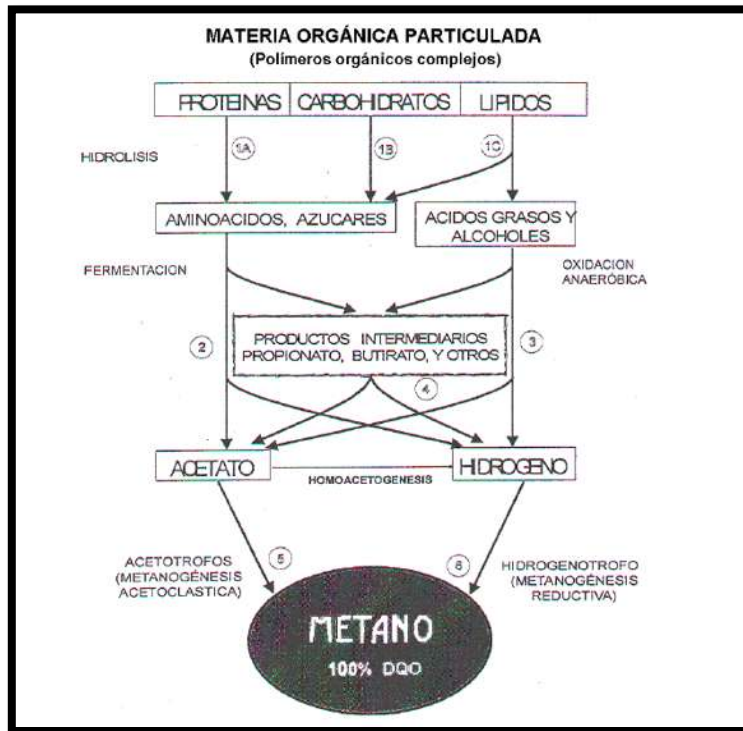


Figura 4. Metabolismo Anaerobio

Dentro de estos procesos con metabolismo anaerobio, podemos presentar dos tipos de reactores comunes que emplean dicho mecanismo de eliminación de contaminantes, como son los Reactores de Biomasa Tipo Granular y los Reactores de Biopelícula.

2.6.1 Reactores de Biomasa Tipo Granular

Dentro de esta categoría, el reactor más común es el llamado Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB); en estos equipos, el caudal de entrada es introducido por la parte inferior del reactor, no existe un relleno para soportar la biomasa formada dentro del tanque, por lo que esta biomasa estará flotando dentro del reactor, separándose por medio de diferencia de densidad. El caudal de salida es retirado por la parte superior del equipo.

En general, estos reactores representan un bajo coste de inversión, sus diseños suelen ser compactos, tienen un bajo consumo de potencia y una buena retención de biomasa.

En la figura presentada a continuación se observa un diagrama de un equipo de esta índole:

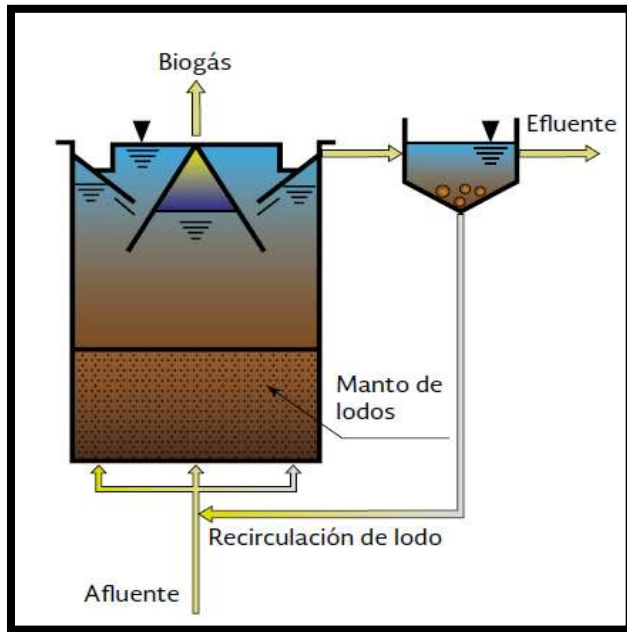


Figura 5. Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

2.6.2 Reactores de Biopelícula

La característica principal de esta clase de reactores, es que poseen un material sólido sobre el cual se forma una biopelícula, donde se cultivan los microorganismos que permiten el tratamiento del agua residual por medio del metabolismo anaerobio.

Un ejemplo de estos equipos son los Reactores de Filtro Anaerobio, en los cuales, al igual que en los reactores de flujo ascendente, el afluente es introducido por la parte inferior del tanque, y el efluente se retira por la parte superior del mismo, sin embargo, en este caso, el reactor cuenta con un relleno (el llamado “filtro”), el cual se encuentra totalmente sumergido en el agua, y cuyos materiales pueden ser plásticos, piedras, o cualquier sólido con una superficie apta para la formación de biopelículas.

A continuación, se presenta un diagrama simple de la distribución de un Reactor de Filtro Anaerobio:

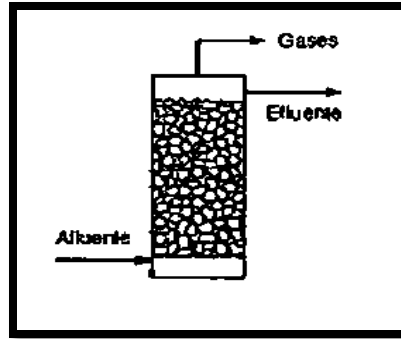


Figura 6. Reactor de Filtro Anaerobio

2.7 Sistemas de Tratamiento Anóxicos

El tratamiento anóxico de aguas residuales, al igual que las condiciones anaeróbicas, indican una ausencia de oxígeno puro. Sin embargo, el agua con ausencia de oxígeno (menos de 0.5 mg/l de oxígeno disuelto) se indica como anóxica. No obstante, en el término anaerobio, se refiere para indicar la ausencia de cualquier aceptor de electrones común, tales como el nitrato, el sulfato o el oxígeno.

Las condiciones en el tratamiento anóxico de aguas residuales indican que se pueden utilizar los iones de nitrato NO_3^- o SO_4^{2-} como agentes de oxidación cuando se descompone la materia orgánica.

Cuando el oxígeno se agota en aguas residuales, las bacterias primero cambian el segundo mejor receptor de electrones. Todo esto puede ocurrir, por ejemplo, en el proceso de desnitrificación en el que el nitrato (NO_3^-) se convierte en nitrógeno libre (N_2) con la descomposición concomitante de la materia orgánica.

Después de la reducción de algunos otros elementos de menor importancia, las bacterias se dirigen a reducir el sulfato del agua, formando compuestos tales como el sulfhídrico (H_2S).

En una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) el tratamiento de nitrificación-desnitrificación por fangos activos es el responsable de reducir los niveles de nitrógeno y la carga contaminante orgánica que se encuentra en estado coloidal o disuelto.

2.8 Procesos Biológicos de Tipo Aerobio

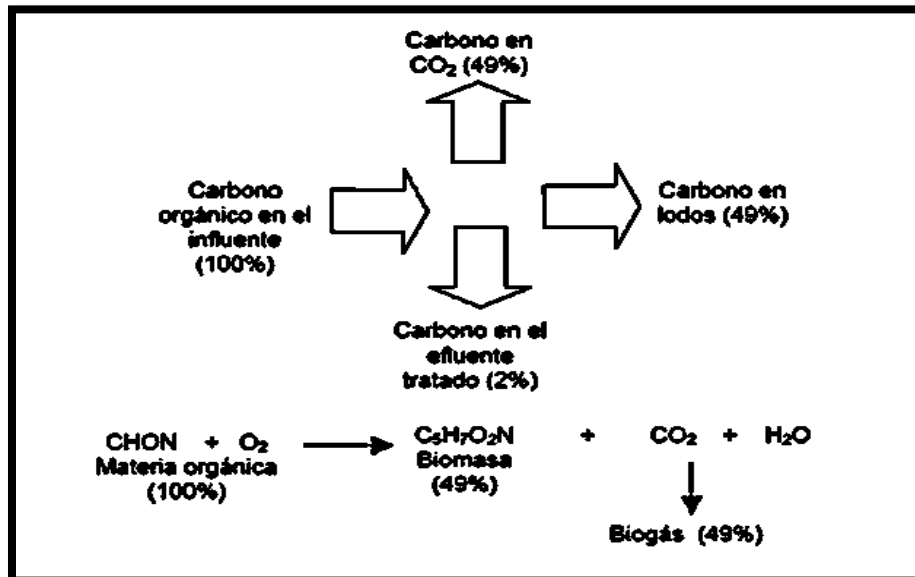
Podemos definir los “Procesos Biológicos de Depuración Aerobia”, como aquellos realizados por un determinado grupo de microorganismos (principalmente bacterias y protozoos) que, en presencia de oxígeno, actúan sobre la materia orgánica e inorgánica disuelta, suspendida y coloidal existente en el agua residual, transformándola en gases y materia celular, que puede separarse fácilmente mediante sedimentación. El oxígeno utilizado para estos procesos generalmente se debe al aire.

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.
- Procesos de Cultivo Fijo (Biopelícula).

El metabolismo aerobio se representa de manera simple en la siguiente reacción:



2.8.1 Procesos de Cultivo en Suspensión

Este tipo de procesos requieren como su nombre lo dice, un cultivo de microorganismos en suspensión en el agua dentro del reactor. El proceso de cultivo en suspensión más usado es el de Lodos Activados.

El proceso más utilizado y conocido en tratamiento biológico de aguas es el proceso de lodos activos o lodos activados. Se fundamenta en la utilización de microorganismos, mayoritariamente bacterias heterótrofas facultativas, que crecen naturalmente en el agua residual y convierten la materia orgánica disuelta y particulada presente en el agua en productos más simples (dióxido de carbono y agua) y nuevas bacterias.

El proceso de lodos activos es un proceso de biomasa en suspensión, los microorganismos crecen en suspensión y se agrupan formando flóculos que a su vez forman una masa microbiana activa llamada “lodo activo o activado”. El término “activo” se refiere a la capacidad de este lodo (microorganismos) para metabolizar la materia orgánica soluble y coloidal a dióxido de carbono y agua. La mezcla de los lodos activos y del agua residual se denomina “licor de mezcla”. En la siguiente figura se representa a grandes rasgos, todo lo que involucra el proceso de lodos activados en un tratamiento secundario:

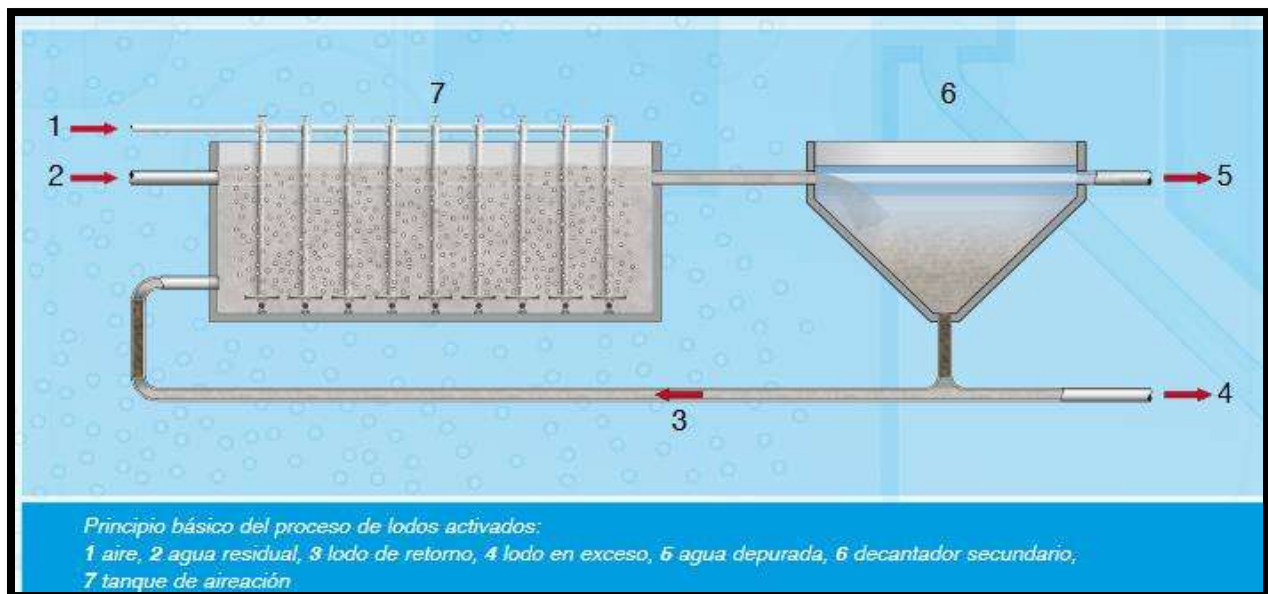


Figura 7. Proceso de Lodos Activados.

2.8.2 Procesos de Cultivo Fijo

Los procesos de cultivo fijo son similares a los ya comentados en el apartado de procesos anaerobios, pues éstos requieren de un material sólido en el cual se pueda fijar un cultivo de microorganismos (la biopelícula), siendo la principal diferencia, el uso de metabolismo aerobio en este caso, es decir, presencia de aire.

La variedad más relevante de este tipo de procesos, se da en los Reactores de Filtro Percolador, donde se sumerge el material sólido (el filtro) en el agua, y se proporciona al sistema un flujo controlado de aire para una metabolización por vía aerobia. A continuación, se presenta un diagrama de un Reactor de Filtro Percolador:

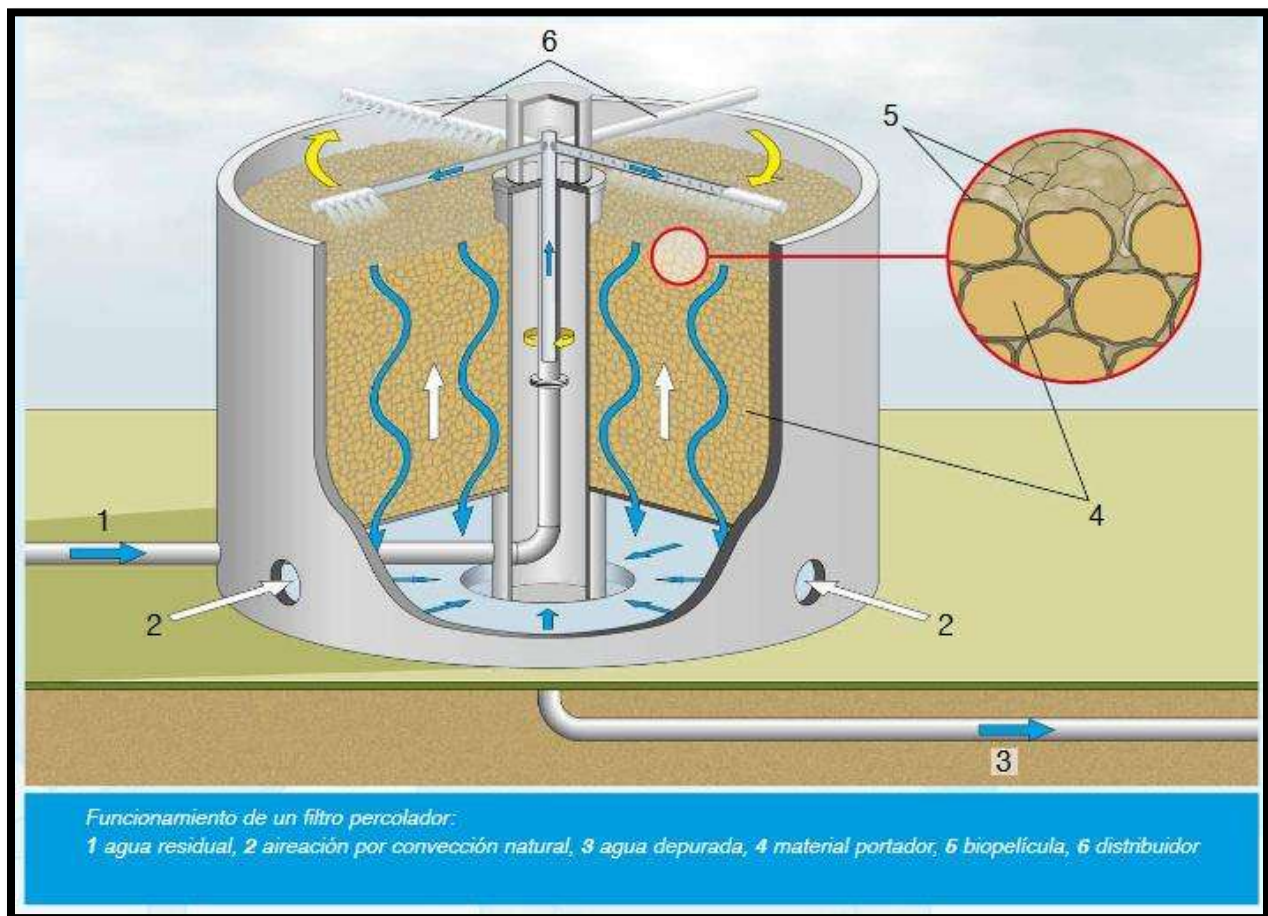


Figura 8. Reactor de Filtro Percolador.

2.9 Biorreactores de Membranas (MBR)

Como ya se abordó, el proceso más convencional para tratamiento de aguas residuales, es el de lodos activados, sin embargo, existen sistemas que incorporan este proceso para una mayor remoción de carga orgánica, siendo el caso de los biorreactores de membranas (MBR).

Su funcionamiento se basa en que el agua del reactor biológico es filtrada pasando a través de las paredes de una membrana, debido a una pequeña depresión producida por una bomba centrífuga. El agua filtrada es extraída del sistema mientras el fango y los compuestos de tamaño superior al poro de la membrana quedan retenidos y permanecen o retornan al reactor biológico.

Este ciclo se alterna con un corto retrolavado, en el que se invierte el sentido del flujo para forzar el paso del agua filtrada desde el interior al exterior de la membrana para limpiarla. Periódicamente, en función del grado de ensuciamiento, se realizan limpiezas químicas en profundidad de las membranas mediante su inmersión en una solución de limpieza.

Los MBR están compuestos por dos partes principales:

- La unidad biológica responsable de la degradación de los compuestos presentes en el agua residual.
- El módulo de la membrana encargado de llevar a cabo la separación física del agua con los contaminantes.

Por su parte, el módulo de la membrana, según su configuración, puede ser de dos tipos:

- Sumergido: las membranas se sitúan dentro del reactor biológico.
- Externo: el contenido de reactor biológico se bombea hacia el módulo de membranas que se ubica a continuación.

En cuanto a los tipos de membranas que se utilizan en los MBR son de Micro-Filtración o de Ultra-Filtración. Este tipo de membranas no retienen sales, nitrógeno, fósforo ni la mayoría de los contaminantes emergentes como lo hacen otras tecnologías de membranas, por lo que posteriormente puede necesitarse también un tratamiento de membranas de ósmosis inversa o de electrodiálisis para proporcionar un tratamiento complementario de desinfección de barrera, antes del tratamiento de desinfección de mantenimiento, necesario para desactivar o destruir los microorganismos patógenos.

En cuanto al material de las membranas en los MBR los más utilizados son polimeros o cerámicos. Las membranas se colocan en módulos que pueden tener diferentes configuraciones siendo las más habituales membranas de placa plana, membranas de fibra hueca y membranas tubulares.

En la figura siguiente se puede observar la distribución de un MBR con las fibras sumergidas:

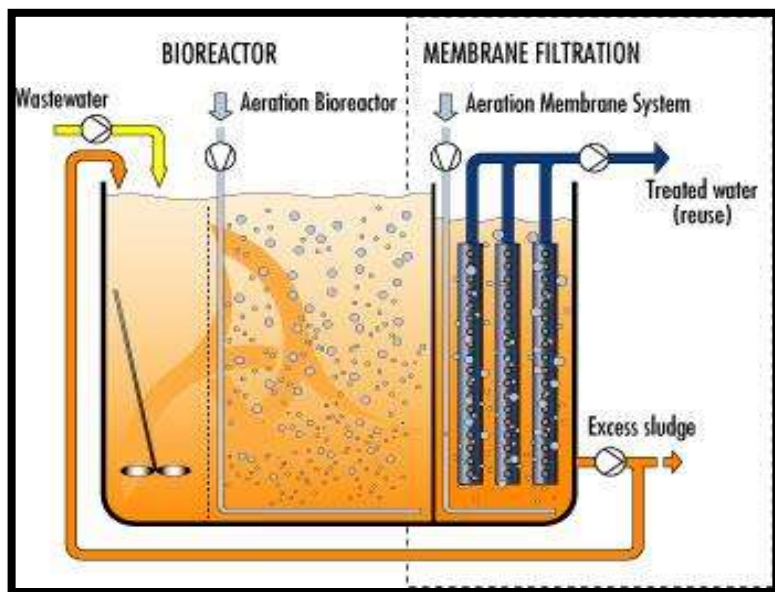


Figura 9. Biorreactor de Membranas Sumergidas.

2.10 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.

2.10.1 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.

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS																					
PARÁMETROS (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 Suspendedos 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 ₅	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.	

Tabla 1. Límites Máximos Permisibles de Contaminantes Básicos según la NOM-001-SEMARNAT-1996

2.10.2 NOM-003-SEMARNAT-1997

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

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

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

Tabla 2. Límites Máximos Permisibles de Contaminantes según la NOM-003-SEMARNAT-1997.

3. Desarrollo Experimental

3.1 Caracterización del Agua Residual

Para determinar la cantidad de contaminantes presentes en el agua residual a tratar, se realizaron pruebas de Nitrógeno, de Fósforo reactivo, Demanda Química de Oxígeno, y Alcalinidad a diario durante un periodo de dos semanas, con el fin de obtener un promedio que brinde mayor precisión.

Dichas pruebas fueron realizadas mediante los métodos de Hanna Instruments para Nitrógeno, Fósforo reactivo y Demanda Química de Oxígeno, los cuales se presentan en el Apéndice A de este documento.

En cuanto a la Alcalinidad, las pruebas se realizaron con el método indicado en la bibliografía de “Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater”, también presentado en el Apéndice A, posteriormente.

Así mismo, se realizaron pruebas de Sólidos Suspendidos Totales, pero éstas fueron realizadas únicamente en dos ocasiones, mediante un equipo de turbidimetría, cuya metodología es indicada en el Apéndice A.

3.2 Diseño del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales

El diseño se realiza centrado en la disminución de DBO, siendo este el parámetro principal para los cálculos de volumen y remoción.

Para realizar los cálculos necesarios para cada uno de los equipos propuestos en el sistema de tratamiento de aguas residuales, se siguió la metodología propuesta por la bibliografía (Wastewater Engineering, Metcalf & Eddy), la cual es profundizada en el Apéndice A.

4. Resultados

4.1 Caracterización del Agua Residual

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

Día	Nitrógeno Total (mg/L)	Fósforo Reactivo (mg/L)	DQO (mg/L)	Alcalinidad (mL de Ácido Sulfúrico)	SST (mg/L)	Alcalinidad (mgCaCO/L)
1	66	27.9	570	8	230	400
2	180	33.6	2688	11.5		575
3	114	55.5	2760	14		700
4	96	51	543	13.4		670
5	114	60.6	2670	15.8	210	790
6	123	28.8	2832	15.8		790
7	132	32.4	2793	15.2		760
8	120	34.2	2652	14.1		705
9	141	44.4	2919	15.3		765
10	123	51	2724	14.4		720
11	135	34.5	2550	15.5		775
12	138	48.6	2781	15.2		760
Promedio	123.5	41.875	2373.5	14.01666667	220	700.8333333

Tabla 3. Resultados de Caracterización de Afluente.

4.2 Diseño del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales

Volumen del Tanque Anaerobio

$$V_{An} = 2.25 m^3$$

Estimación de DBO a la salida del Tanque Anaerobio

$$DBO_{AnOUT} = 189.69012 \text{ mg/L}$$

Volumen del Tanque Anóxico

$$V_{Anox} = 0.1537 \text{ m}^3$$

Volumen del Tanque de Preaireación

$$V_{Preair} = 0.5286 \text{ m}^3$$

Volumen del Tanque con las Fibras Sumergidas

$$V_{MBR} = 0.24 \text{ m}^3$$

Volumen total del Tanque con Aireación (Preaireación + Fibras)

$$V_{Tair} = 0.7686 \text{ m}^3$$

Estimación de DBO a la salida del sistema

$$DBO_{OUT} = 28.4535 \text{ mg/L}$$

Conclusiones

Al analizar los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, podemos afirmar que se cumple con el cometido de la hipótesis, concluyendo lo siguiente:

1. La implementación de un sistema de tratamiento, con una combinación de etapas anaerobia – anóxica – aerobia, es efectiva en cuanto a la remoción de carga orgánica en grandes cantidades, pues complementan las deficiencias que pueda presentar alguna etapa por separado.
2. El uso de un Reactor de Fibras Huecas Inmersas proporciona mayor rentabilidad al proceso, pues logra eliminar carga orgánica, teniendo un tiempo de retención menor en comparación a los sistemas de lodos activados convencionales.
3. La remoción estimada a lograrse con este sistema de tratamiento cumple con los límites máximos permisibles establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas, dejando margen a acortar los tiempos de retención hidráulica en determinadas partes del proceso, pues esto puede optimizar el proceso manteniendo el propósito principal de seguir bajo el cumplimiento de las normas.

Así pues, se demostró que un tren de tratamiento Anaerobio – Anóxico – Aerobio implementando un reactor de Fibras Huecas Inmersas en ésta última parte, logra reducir la alta carga orgánica presente en diversos afluentes de aguas residuales, cumpliendo con los estándares establecidos por las normas mexicanas.

Observaciones

La construcción a escala de un sistema como el que aquí se propone, para el tratamiento de aguas residuales en lugares donde se generan altas cargas orgánicas y que no cuentan con sistemas de alcantarillado, se plantea que sirva para solucionar dicha problemática, haciendo uso de este conocimiento para su correcta implementación, e incluso, para su optimización.

Bibliografía

- 1) Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. McGraw Hill, Fifth Edition (2014).
- 2) Ramalho R.S. Tratamiento de Aguas Residuales. Editorial Reverté, Primera Edición (1990).
- 3) Baird R.B., Eaton A.D., Rice E.W. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Water Works Association, 23rd Edition. (2017)
- 4) Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 29: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente. SEMARNAT – CONAGUA. (2015)
- 5) Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 26: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Pretratamiento y Tratamiento Primario. SEMARNAT – CONAGUA. (2015)
- 6) Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996
- 7) Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997

Apéndice A

Metodología de Caracterización de Aguas Residuales

A1. Prueba de Nitrógeno Total

Método del ácido cromotrópico. La digestión de un persulfato convierte todas las formas de nitrógeno en nitrato. Luego la reacción entre el nitrato y los reactivos causa un tinte amarillo en la muestra.

Se utiliza espectrofotómetro ajustado a 420 nm, y un reactor para digestión.

El procedimiento es el siguiente:

- Precaliente el Reactor de Hanna C 9800 a 105 °C (221°F). Para un correcto uso del reactor siga el Manual de Instrucciones del Reactor. Se recomienda encarecidamente el uso de la protección de seguridad HI740217 opcional. No utilice horno ni microondas porque las muestras con fuga pueden generar una atmósfera corrosiva y posiblemente explosiva.
- Abra la tapa de 2 Viales de Digestión (viales con tapa roja o código 17xx).
- Añada a cada vial el contenido de un paquete de Persulfato de Potasio para análisis de Nitrógeno Total.
- Añada exactamente 0,5 ml de muestra a un vial (vial de la muestra), y 0,5 ml de agua desionizada al otro vial (vial del blanco), mientras mantiene los viales con un ángulo de 45 grados.
- Cierre la tapa fuertemente y agite los viales vigorosamente durante aprox.30 segundos hasta que todo el polvo esté completamente disuelto.
- Inserte los viales en el reactor y caliéntelos durante 30 minutos a 105°C. Nota: para obtener resultados de la mayor precisión, se recomienda encarecidamente retirar los viales del reactor tras exactamente 30 minutos.
- Al final del período de digestión coloque los viales cuidadosamente en la parrilla de enfriamiento y deje que se enfríen a temperatura ambiente. Atención: como los viales están todavía calientes, tenga cuidado al manipularlos.

- Abra la tapa de los viales y añada el contenido de un paquete de Metabisulfito de Sodio para análisis de Nitrógeno Total a cada vial. Cierre la tapa fuertemente y agite los viales suavemente durante 15 segundos.

- Abra la tapa de los viales y añada el contenido de un paquete de Reactivo Nitrógeno Total HI 93767-0 a cada vial. Cierre la tapa fuertemente y agite los viales suavemente durante 15 segundos.

Espera 2 minutos (sin agitar los viales) para permitir que la reacción se complete.

- Abra la tapa de 2 Viales de reactivo.

- Añada exactamente 2,0 ml de muestra digerida (del vial con tapa roja muestra digerida) a un Vial de Reactivo (vial muestra), y 2,0 ml de blanco digerido (del vial con tapa roja del blanco digerido) al otro Vial (vial del blanco), mientras mantiene los viales con un ángulo de 45 grados.

- Cierre la tapa fuertemente e inviértalos viales 10 veces.

- Coloque el vial del blanco en el espectrofotómetro y elija la opción Nitrógeno Total HR, pulse ZERO, y espere a que calibre la medición

- Retire el vial del blanco y coloque el vial de la muestra en el espectrofotómetro, pulse READ DIRECT y en unos momentos, aparecerá el valor en mg/l de nitrógeno total.

A2. Prueba de Fósforo Reactivo.

Adaptación del método EPA 365.2 y Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th edition, 4500-P E, método ácido ascórbico. La reacción entre los ortofosfatos y el reactivo origina una coloración azul en la muestra.

Se utiliza espectrofotómetro calibrado a 610 nm.

- Seleccione el número de programa correspondiente a Fósforo, Reactivo en el display secundario.
- Abra la tapa de un Vial de Reactivo.
- Añada exactamente 5,0 ml muestra al vial, mientras mantiene el vial con un ángulo de 45 grados
- Coloque la tapa y mézclelo invirtiendo el vial un par de veces. Este es el blanco.
- Marque el vial con un lápiz en la banda blanca para tener una señal de orientación. Use esta señal para insertar el vial de test en el porta-viales siempre en la misma posición.
- Coloque el vial en el porta-viales y empuje hasta introducirlo totalmente.
- Espere unos segundos a que el display muestre “-0.0-”. Ahora el medidor está a cero y listo para medición.
- Abra la tapa y añada el contenido de un paquete de HI 93758-0 Reactivo Fósforo.
- Cierre la tapa fuertemente y agítelo suavemente durante 2 minutos hasta que la mayor parte del polvo esté disuelta. Esta es la muestra tratada.
- Coloque el vial en el porta-viales y empuje hasta introducirlo totalmente. Asegúrese de que la orientación del vial con respecto al porta-viales es la misma que la del blanco.
- Pulse TIMER y el display mostrará la cuenta atrás previa a la medición. Como alternativa, espere 3 minutos y pulse READ DIRECT. En ambos casos "SIP" parpadeará durante la medición.
- El instrumento muestra directamente en el display la concentración en mg/l de Fosfato (PO₄³⁻)

A3. Prueba de Demanda Química de Oxígeno

Adaptación del método 410.4 aprobado por USEPA para la determinación de DQO en aguas superficiales y aguas residuales. Los compuestos orgánicos oxidables reducen el ion dicromato (naranja) a ion cromo (verde). Se determina la cantidad de ion cromo formado.

El espectrofotómetro debe ajustarse a 610 nm.

- Elija una muestra homogénea. Las muestras que contengan sólidos sedimentables necesitan ser homogeneizadas mediante un mezclador.
- Precaliente el Reactor de Hanna C 9800 a 150 °C (302°F). Para un correcto uso del reactor siga el Manual de Instrucciones del Reactor. Se recomienda encarecidamente el uso de la protección de seguridad HI 740217 opcional. No utilice horno ni microondas porque las muestras con fuga pueden generar una atmósfera corrosiva y posiblemente explosiva.
- Abra la tapa de 2 viales de Reactivo.
- Añada exactamente 0,2 ml de muestra a un vial (vial muestra), y 0,2 ml de agua desionizada al otro vial (vial del blanco), mientras mantiene los viales con un ángulo de 45 grados. Cierre la tapa fuertemente y mézclelo invirtiendo cada vial un par de veces. Atención: como los viales se calientan durante el mezclado, manipúlelos con cuidado.
- Inserte los viales en el reactor y caliéntelos durante 2 horas a 150°C.
- Al final del período de digestión desconecte el reactor. Espere durante 20 minutos para dejar que la temperatura de los viales baje hasta 120°C.
- Invierta cada vial varias veces mientras todavía están templados, a continuación colóquelos en la parrilla de enfriamiento. Atención: como los viales están todavía calientes, manipúlelos con cuidado.
- Deje los viales en la parrilla de enfriamiento para que se enfríen a temperatura ambiente. No los agite ni invierta más si no las muestras podrían volverse turbias.
- Seleccione el número de programa correspondiente a Demanda Química de Oxígeno, Rango Alto (DQO) en el display secundario.

- Coloque el vial de blanco en el porta-viales y empújelo hasta el fondo.
- Pulse ZERO y "SIP" parpadeará en el display.
- Espere unos segundos y el display mostrará “-0.0-”. Ahora el medidor está a cero y listo para medición.
- Coloque el vial de la muestra en el porta-viales y empújelo hasta el fondo.
- Pulse READ DIRECT y "SIP" parpadeará durante la medición.
- Multiplique la lectura del display por 10 para obtener la concentración en mg/l de la demanda de oxígeno.

A4. Prueba de Alcalinidad

La prueba de alcalinidad se realiza mediante un ensayo de volumetría, donde colocamos 100 ml de una muestra 3 a 1, usando como titulante una solución 0.1 N de Ácido sulfúrico, y como indicador el anaranjado de metilo.

Una vez que se logró el vire de la muestra con el indicador al añadir el ácido, se lee el volumen consumido, para posteriormente aplicar la siguiente fórmula que nos dará el valor de la alcalinidad:

$$\text{Alcalinidad} \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{L}} = \frac{A \times N \times 50000}{\text{mL de muestra}}$$

Donde: A = ml de ácido consumidos.

N = Normalidad del ácido.

A5 Prueba de Sólidos Suspendidos Totales

Se utilizó un espectrofotómetro multifuncional portátil de la marca Hanna, donde se introdujo una alícuota de la muestra en relación 3 a 1, y únicamente se tomo nota del valor arrojado por el equipo en cuanto a Sólidos Suspendidos Totales. El medio que usaba para medir dicho valor, era de Turbidimetría.