



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA EFLUENTES
DOMÉSTICOS BASADO EN METODOLOGÍA MBBR (MOVING BED BIOFILM
REACTOR) A ESCALA PILOTO.

AUTOR

Jorge Quinteros Sanclemente

Año

2019



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA EFLUENTES
DOMÉSTICOS BASADO EN METODOLOGÍA MBBR (MOVING BED BIOFILM
REACTOR) A ESCALA PILOTO

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniero Ambiental en Prevención y
Remediación

Profesor Guía
MSc. Santiago Daniel Piedra Burgos

Autor
Jorge Quinteros Sanclemente

Año
2019

DECLARACIÓN PROFESOR GUÍA

"Declaro haber dirigido el trabajo, Diseño de un sistema de tratamiento para efluentes domésticos basado en metodología MBBR (Moving bed biofilm reactor) a escala piloto, a través de reuniones periódicas con el estudiante Jorge Quinteros Sanclemente, en el semestre 201920, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".

Santiago Daniel Piedra Burgos

Master of Science in Hydro Science and Engineering

C.I. 1715384150

DECLARACIÓN PROFESOR CORRECTOR

"Declaro haber revisado este trabajo, Diseño de un sistema de tratamiento para efluentes domésticos basado en metodología MBBR (Moving bed biofilm reactor) a escala piloto, del Jorge Quinteros Sanclemente, en el semestre 201920, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".

Daniel Hernán Hidalgo Villaba

Magister en Ciencias Especialización Ingeniería Ambiental

C.I: 1801914449

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

Jorge Quinteros Sanclemente

C.I. 1726055773

AGRADECIMIENTOS

Agradezco completamente a todas las personas que hicieron que este trabajo de titulación sea realidad, al docente Santiago Piedra por su tiempo, dedicación y su mística de enseñanza, al Sr. Alfonso González, por la ayuda y el apoyo incondicional que se prestó. A mis amigos que siempre estuvieron alentándome para seguir adelante, su apoyo excepcional es el que me hizo llegar a este punto de mi vida. A mi familia y los que estuvieron presentes para la culminación de esta etapa.

DEDICATORIA

A mi padre, que es el gran mentor de mi vida, por siempre guiarme por el buen camino, ser la persona que me ha apoyado incondicionalmente, y ha realizado un esfuerzo sobrehumano por mi bienestar, la persona que más admiro en este mundo. A mi madre, la luz de mi vida, mi motor, todo el cariño que siempre me ha dado, cada uno de mis logros siempre serán gracias a todo el amor que ha sabido compartir. A mis hermanas, que siempre me han estado dándome fuerzas, y a todos los amigos incondicionales que estuvieron en todo este proceso

RESUMEN

El presente trabajo tuvo el fin de construir y evaluar un tanque prototipo para tratamiento de aguas residuales, como una operación unitaria más, en el cual se realizó un proceso biológico de lecho fluidizado (MBBR), esta tecnología permite que debido a las características de su diseño y alta área superficial por unidad de volumen que posee el relleno plástico disminuya el espacio y tiempo necesario frente a procesos convencionales, siendo una mejor alternativa para otros procesos ya existentes.

Previo al diseño y construcción se realizó un análisis teórico de los parámetros de diseño requeridos tales como: carga diaria de DBO a tratar, caudal de entrada, área superficial de los soportes plásticos y porcentaje de soportes plásticos a ser introducidos en el reactor. También se pudo estimar el tiempo de retención hidráulico para el tratamiento del agua residual. Todos estos parámetros permitieron llegar al dimensionamiento del tanque reactor para posteriormente modelarlo y finalmente construir para evaluarlo. La construcción del tanque reactor fue en material acrílico de 9mm de espesor, que permite resistencia para un tiempo prolongado de funcionamiento, además que permite observar su funcionamiento interno. En el tanque se utilizó un soporte que permitirá que se sostengan dos difusores de aire de burbuja fina de 12 pulgadas de diámetro que permite inyectar aire dando como resultado el movimiento y posterior fluidización del lecho.

Como resultados, con un caudal de 40 l/min, el dimensionamiento del tanque llegó a ser de $0,57\text{m}^3$, en el cual se ingresó $0,20\text{m}^3$ de material de relleno, el soporte plástico es de $500\text{ m}^2/\text{m}^3$, para el correcto funcionamiento del reactor. Finalmente se evaluó el sistema para evidenciar la eficiencia de este, determinando que se reduce considerablemente la cantidad de área necesaria en comparación a los sistemas convencionales de reactores de lodos activados.

ABSTRACT

The present investigation has the purpose of constructing and evaluating a prototype tank for wastewater treatment, as a further unitary operation, where a biological process of moving bed biofilm reactor (MBBR) was carried out, this technology allows that due to the characteristics of its design and high surface area per unit volume that has the biocarrier, being a better alternative for other existing processes.

First to the design and construction, a theoretical analysis of the required design parameters was carried out, such as: Daily load of BOD to be treated, Inlet flow, Surface area of the biocarriers, and amount biocarriers to be introduced in the reactor. It was also possible to estimate the hydraulic retention time for wastewater treatment. All these parameters allowed to reach the sizing of the reactor tank to later model it and finally build it to evaluate it. The construction of the reactor tank was carried out using 9mm thick of acrylic material, which allows resistance for a relatively long time of operation, in addition to observing his internal functioning. A support was used in the tank that will allow two fine bubble air diffusers of 12 inches in diameter to be held, which will act as mixers for the plastic supports that will be inside the tank and with this injection allows the movement and subsequent fluidization of the bed.

As a result, with a flow rate of 40 l/ min, the sizing of the tank reached 0.57m^3 , in which $0,20\text{m}^3$ of biocarrier was added, the biocarrier is $500\text{m}^2/\text{m}^3$, for the correct reactor operation. Finally, the system was evaluated to demonstrate the efficiency of this, determining that the amount of area needed is considerably reduced compared to conventional activated sludge reactor systems.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Alcance	4
1.3 Justificación.....	5
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo General	6
1.4.2 Objetivos específicos	6
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Agua residual y calidad del agua.....	6
2.2 Factores para saneamiento en el mundo	8
2.3 Estado actual de agua en el Ecuador	8
2.4 Tratamiento de aguas residuales	10
2.5 Tratamientos primarios de aguas residuales	11
2.5.1 Tratamientos secundarios de aguas residuales.....	11
2.5.2 Tratamientos terciarios de aguas residuales.....	12
2.6 Tratamiento biológico de aguas residuales	13
2.6.1 Procesos que se dan en los tratamientos biológicos	13
2.7 Reactores de biopelícula	15
2.8 Reactores de biopelícula de lecho móvil (MBBR).....	16
2.8.1 Ventajas del tratamiento MBBR	18
2.8.2 Desventajas del tratamiento MBBR	19
2.9 Crecimiento de biopelícula en el reactor MBBR	19

3. METODOLOGÍA.....	21
3.1 Diseño.....	21
3.2 Cálculos para el dimensionamiento.....	21
3.3 Construcción del tanque y estructura.	25
3.4 Pruebas hidráulicas.....	25
3.4.1 Pruebas de estanqueidad.....	25
3.4.2 Pruebas de funcionamiento.....	26
3.5 Recolección de agua para pruebas de tratabilidad.....	26
3.6 Caracterización fisicoquímica.....	27
3.6.1 Medición de pH.....	27
3.6.2 Turbidez.....	27
3.6.3 DQO.....	27
3.6.4 DBO ₅	28
3.6.5 Determinación de sólidos.....	28
4. RESULTADOS.....	31
4.1 Cálculos para dimensionamiento.....	31
4.1.1 Entradas generales.....	31
4.1.2 Cálculos para volumen de soporte plástico y dimensiones para el volumen del tanque.....	31
4.2 Modelo de AutoCAD.....	36
4.3 Pruebas hidráulicas.....	37
4.4 Pruebas de tratabilidad.....	40
4.5 Caracterización de agua residual inicial y final.....	40
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	46

5.1 Conclusiones.....	46
5.2 Recomendaciones.....	47
REFERENCIAS.....	48
ANEXOS	56

1. INTRODUCCIÓN.

1.1 Antecedentes.

El uso del agua en grandes ciudades genera efluentes residuales domésticas e industriales, las cuales conllevan un gran número de contaminantes que previo a su descarga a los cuerpos de agua no son tratados debidamente. Las aguas residuales son un componente en el ciclo del uso de agua, desde la captación, distribución, uso y tratamiento hasta su final retorno al medio ambiente. Sin embargo, el tratamiento de aguas residuales no recibe ninguna clase de atención tanto social como política (Agudelo, 2005).

Las aguas residuales resultan a partir de diferentes tipos de uso tanto como industrial, comercial, agrícola o uso doméstico. Estas descargas dan como resultado características en el agua como: sólidos suspendidos y sedimentables, materia orgánica, nutrientes, tensoactivos, metales pesados, organismos patógenos, entre otros muchos elementos ajenos a las aguas naturales que desencadenan en efectos negativos para el medio ambiente (Kiefer, 2019).

Se puede estimar que en América Latina existe una descarga de efluentes del 94% directamente a los cuerpos de agua sin recibir tratamiento previo, es decir un total de cuarenta y ocho millones de metros cúbicos al día, que provocan daños al medio ambiente. Estas descargas se utilizan para actividades agrícolas como riego de cultivos que provocan un deterioro en los suelos agrícolas y una baja seguridad alimentaria (Ballesteros y Brown, 2005). Debido a lo anteriormente expuesto, es necesario que, el tratamiento de aguas residuales sea un tema primordial para detener el tema de los efectos dañinos al medio ambiente, estos procesos incluyen tratamientos físicos, químicos y biológicos los que ayudan a la remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales (Mohammed y Elbably, 2019).

En estudios realizados en el año 2010 por la Secretaria Nacional del Agua (SENAGUA) en el Ecuador solamente el 10% de aguas residuales es tratada, el resto va directamente descargada a los sistemas de alcantarillado o a los ríos, quebradas y lagunas (CEPAL, 2019). Más de un 80% de aguas residuales industriales proceden de las actividades agroindustriales, de comercio o la industrialización que tiene como resultado la generación de aguas residuales con alto contenido orgánico (Sánchez, 2014).

Una planta de tratamiento de aguas residuales tiene un proceso que pasa por varias operaciones unitarias las cuales están encargadas de remover uno o varios contaminantes por cada operación unitaria establecida. Generalmente una planta de tratamiento de aguas residuales, tiene tres tratamientos definidos que son: La remoción física o sedimentación de arenas, basura y residuos grandes que son realizados en el primario, el secundario y el terciario son parte de sistemas más complejos químicos-biológicos que en algunos casos se complementan para la remoción de desechos especiales, uno de los más altos parámetros que presentan peligros es la materia orgánica, todos estos estudios, implementaciones y procesos son realizados con el fin de purificar el agua residual previo a su descarga y disposición final (HDHS, 2014).

Debido a que las plantas de tratamiento residuales son un tema relativamente nuevo en el Ecuador, existen problemas operacionales ya que en las plantas de tratamiento que están en funcionamiento en el país, no tienen un mantenimiento y operación que sea a cargo de personal especializado, los problemas generales de una planta de tratamiento residuales son generalmente: altos y bajos flujos de agua que pueden afectar a la eficiencia de las plantas, malos olores que surgen a partir del excesivo almacenamiento del agua en tanques o colectores. En adición, existe una gran cantidad de problemas con las bombas que transportan el agua, esto se debe a la parte eléctrica de las mismas, por falta de mantenimiento, o por permitir y no controlar la entrada de grasas, aceites y arena en las bombas (Qasim, 1999).

Uno de los principales contaminantes de las aguas residuales es la carga orgánica biodegradable que se la expresa como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) la cual siempre es medida al 5 día, este es uno de los parámetros de mayor problema al ser descargados a los sistemas hídricos, incluso después de haber sido tratados (IDEAM, 2014). La contaminación que existe en el agua residual produce varios efectos negativos a diferentes niveles, en los que están expuestos por (Takasaki y Kim, 2002):

- Disminución de recursos hídricos disponibles.
- Deterioro para el uso como: consumo humano, industria, agricultura, pesca.
- Reducción de la capacidad auto depuradora de los cauces receptores de aguas residuales.

En el aspecto de la degradación de la carga orgánica por medios biológicos ha sido un proceso que se ha venido complementando, aumentando y mejorando en las últimas décadas, gracias a su alta eficiencia de remoción de materia orgánica. Una limitante a este proceso es el requerimiento de áreas bastante extensas para su implementación.

Es por lo que, se han venido investigando e implementando procesos de bio-reactores tales como la tecnología de lecho fluidizado móvil *Moving bed biofilm reactor* (MBBR) por sus siglas en inglés o los lechos de membrana *Membrane Biofilm Reactor* (MBR), los dos trabajan bajo el mismo sistema de lodos activados, pero implementando material fijo para adhesión de biomasa con altas áreas superficiales para reducir el espacio necesario para los tratamientos biológicos tradicionales. Además, estas tecnologías presentan la capacidad de auto asimilación de diferentes cargas orgánicas en las aguas residuales para sus tratamientos (Wolff, Ochoa, Paul, y Costa, 2005).

Los reactores biológicos de lecho fluidizado móvil (MBBR) fueron desarrollados en 1988 en Noruega por Hallvard Odegaard (Odegaard, 1999) En la actualidad existen alrededor de 500 plantas de tratamiento que incluyen en sus

operaciones unitarias el tratamiento MBBR, tanto en sectores industriales como municipales. Las ventajas que presenta esta tecnología es la mejor transferencia de oxígeno, tiempos de retención hidráulica relativamente cortos, altas tasas de remoción de materia orgánica y una gran área específica dentro de los reactores en comparación a la poca área superficial que necesitan (Sombatsompop y Ganczarczyk, 2006).

Adicionalmente, los sistemas MBBR han sido implementando en tratamientos biológicos para plantas de tratamiento de agua potable y criaderos de peces. El principio de funcionamiento del MBBR es la utilización medios o soportes inertes llamados *biocarriers*, soportes plásticos o biosoportes, para el crecimiento de la biopelícula en los mismos, maximizando la superficie utilizada por la misma por la biomasa que se encuentra activa en el reactor.

Estos reactores poseen una pérdida mínima de biomasa lo que consecuentemente hace que no necesiten una limpieza frecuente como es el caso de los métodos de lodos activados (Rusten, Eikebrokk, Ulgenesb, y Lygren, 2016). Los soportes plásticos son polímeros porosos que, se mueven continuamente en el tanque de aireación, estos componentes plásticos representan una superficie alta por unidad de área que en el mercado se puede encontrar desde $300 \text{ m}^2/\text{m}^3$ hasta los que sobrepasan los $3500 \text{ m}^2/\text{m}^3$. La selección de dichos soportes plásticos también depende de factores como: el porcentaje de llenado en el tanque, el caudal de entrada de agua residual, la carga orgánica presente, entre otros (Balarezo, 2018).

1.2 Alcance.

Diseñar, construir y evaluar el sistema de tratamiento de aguas residuales *Moving bed biofilm reactor* (MBBR) a escala piloto por medio de ecuaciones en base empírica, obteniendo las dimensiones respectivas, el tiempo de retención hidráulica, cantidad de soporte plástico necesario, volumen de agua a tratar. Realizando el modelado 3D y planos en AutoCAD para permitir la construcción de un prototipo a escala piloto con materiales específicos para los procesos

como difusores y soportes plásticos de alta área superficial por unidad de volumen, y paredes de acrílico para finalmente obtener los resultados de las pruebas hidráulicas a realizar y caracterización del agua con parámetros básicos de control antes y después del tratamiento.

1.3 Justificación.

La importancia del estudio es investigar nuevas tecnologías con costes accesibles y de alta eficiencia para completar los tratamientos de aguas residuales las cuales no llegan a cumplir con los límites máximos permisibles que están en fijados en la ley (Guzman y Narváez, 2016).

La importancia de degradar la materia orgánica de los efluentes industriales es de alto grado, ya que una descarga sin previo tratamiento ocasionará en los cuerpos de agua una desoxigenación, debido a que la cantidad de oxígeno presente en el agua es necesaria para poder degradar por medios químicos o biológicos los contaminantes, esto desencadena en el incremento de la dificultad en el proceso de remoción de los contaminantes e impidiendo depuración de aguas residuales (Cohen, 2001). Cuando existe requerimientos altos de oxígeno para la degradación, existe una competencia entre los organismos los cuales lo necesitan alterando el equilibrio y la vida acuática, la materia orgánica es una medida de la contaminación que se presenta en las aguas.

Por lo expuesto anteriormente, que una razón de gran importancia es el motivo de reducir costos de operación, de terrenos y espacio requerido para diferentes tipos de tratamientos, por causar menos impacto al momento de tratar aguas residuales y con el fin de mejorar la eficacia en los procesos para tratamientos de aguas residuales, es necesario investigar la efectividad, eficiencia y eficacia de un proceso como el reactor de lecho móvil (MBBR) en condiciones de laboratorio a escala piloto, y la viabilidad de ser aplicable en los diferentes procesos de tratamiento de aguas residuales en el Ecuador.

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo General.

Diseñar un sistema a escala piloto basado en la tecnología MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) para tratamiento de aguas.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Construir un sistema experimental a escala piloto MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor).
- Evaluar mediante pruebas hidráulicas el sistema MBBR.
- Caracterizar los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales antes y después del tratamiento.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1 Agua residual y calidad del agua.

El agua residual se define como efluentes, los cuales han sido utilizados para procesos tanto como industriales, agrícolas o domésticos. El nivel de carga contaminante y el tratamiento para recibir, varía según el uso que se le dio, origen o tipo de residuo que recibe (Bahadori y Smith, 2016).

El agua y el acceso a ella con calidad, es un factor de altísima importancia para que el ser humano tenga estabilidad en saneamiento y buen vivir, ya que esta es de vital importancia y debe ser adecuada para el consumo doméstico, alimentación y aseo como necesidades básicas (OPS, 1988). Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) se establece para el consumo humano una cantidad de análisis diversos en aspectos tales como sus características fisicoquímicas y biológicas, para cumplir los parámetros de calidad de agua.

Para simplificar la interpretación de los parámetros de la calidad del agua se han creado los índices de calidad del agua (ICA) y también se encuentran índices de contaminación (ICO), los cuales simplifican una gran cantidad de parámetros en una simple expresión para un entendimiento fácil entre técnicos, administradores y población en general. Los ICA son una herramienta muy útil para la evaluación de calidad de agua, y sus parámetros de mayor relevancia empleados son: Oxígeno disuelto, pH, DBO, nitratos, coliformes fecales, temperatura, turbiedad y sólidos disueltos totales (Torres y Patiño, 2009).

En las últimas décadas, la calidad del agua ha sido un factor de gran importancia, el cual ha ido disminuyendo a nivel mundial, esto se debe a factores como las actividades humanas y fuentes naturales. En el caso de contaminación natural pueden ser explosiones volcánicas, deslaves, metales pesados que existen de forma natural en la corteza terrestre, pero este tipo de contaminación es muy baja y dispersa que no desencadena en índices de contaminación altos (UNESCO, 2003).

Por otro lado, la contaminación que se debe a las actividades antrópicas contiene contaminantes como sales, residuos de hidrocarburos por la extracción del petróleo, solventes muy dañinos utilizados en las industrias, agricultura, los lixiviados de los rellenos sanitarios, pozos sépticos y otros. Las actividades agrícolas son dependientes de insumos como plaguicidas y fertilizantes que contribuyen significativamente con la contaminación del agua (Abarca y Mora, 2007).

La importancia del recurso agua y su buena calidad está relacionada de manera directa con la salud mundial, sin importar el uso que se le dé. La cantidad de agua que se utiliza diariamente por las personas sea en agricultura, uso doméstico, producción de comida, industria o recreación, da como resultado un uso irresponsable del recurso. Se estima que para el 2025, más de un 50% de la población total en el mundo estará expuesta a vivir en zonas con más alta demanda de agua que la que se encontrará disponible (WHO, 2013).

En promedio, los países desarrollados con un ingreso económico alto cuentan aproximadamente el 75% de tratamiento de sus efluentes tanto como domésticos (a nivel de municipios), como en industrias. Estos valores en comparación a que los países de ingresos medios, que están en vías de desarrollo, tratan un 40% de sus aguas residuales, este porcentaje recae en un 30% en los países que están empezando a desarrollarse y finalmente los países que no están en desarrollo tienen solamente un tratamiento de un 8% de las aguas residuales, como resultado nos da un total mundial de un 20% de las aguas residuales que están siendo tratadas en todo el mundo, lo que nos deja un significativo 80% de las mismas que se vierten directamente al medio ambiente sin previo tratamiento y con altas cantidades de contaminantes.

2.2 Factores para saneamiento en el mundo.

La importancia de contar con servicios de saneamiento básico para la población tiene el fin de llegar a una buena salud pública. En muchos países industrializados, las aguas residuales son tratadas con operaciones complejas y transportadas lejos de las poblaciones para evitar su contaminación cercana (Henze, 2017).

En el 2008, la Asamblea General de las Naciones Unidas declaró que ese sea el Año Internacional del Saneamiento con el fin de encaminar la atención mundial para implementar todas las soluciones de saneamiento posibles. La importancia no es solo llegar a la gente, si no que los sistemas de alcantarillado y plantas de tratamiento de aguas residuales implementados por las industrias y gobiernos de cada país sean eficientes para eliminar contaminantes y poder transportar agua sin generar peligros para las poblaciones (Henze, 2017).

2.3 Estado actual de agua en el Ecuador.

Según la publicación de la SENAGUA en el 2011, las demandas de agua en el país están divididas en 80% para actividades agrícolas, un 13% en uso doméstico y un 7% en uso industrial (SENAGUA, 2011). El uso para

generación de energía eléctrica es el 53% del caudal total, y esta energía representa el 48% de la energía total utilizada en el país (CONELEC, 2009).

La minería causa impactos ambientales en el norte, sur y en varias cuencas de los ríos amazónicos, los potenciales contaminantes presentes en estas actividades son cianuro, mercurio y sólidos suspendidos. El uso no adecuado de productos sanitarios, exceso en uso de fertilizantes, también han venido afectando los recursos hídricos, gracias al inicio en la década de los 70 del cultivo no tradicional de las flores en el Ecuador, que utiliza grandes cantidades de fertilizantes y plaguicidas (CEAS, 2005).

La gestión eficiente del recurso hídrico en la capital del Azuay, Cuenca, ha permitido que la Empresa Municipal de Telecomunicaciones y Agua Potable (ETAPA) provea uno de los mejores servicios del país, en el año 2000 esta empresa hizo un cambio y reubicación de medidores obsoletos, reducción en la red de agua y se cambiaron las matrices obsoletas. El alcantarillado está alineado con el saneamiento de los 4 ríos que rodean la ciudad que es un eje fundamental. Se cuenta con una Planta de tratamiento de aguas residuales para la remoción de contaminantes presentes, producidas en la ciudad de Cuenca (ETAPA, 2008).

En el Ecuador esta implementada la estrategia nacional de agua potable y saneamiento que tiene dos principios fundamentales que son: la universalización del acceso a servicios de agua y saneamiento; y, la segunda es el aseguramiento de calidad y sostenibilidad de los servicios (SENAGUA, 2016). Basándose en estos principios el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), la SENAGUA, el Banco Mundial y la Unicef se unieron para presentar cifras respecto al saneamiento básico en el Ecuador. El 85.5% de la población tiene acceso a instalaciones de higiene adecuadas, y acceso a sistemas de saneamiento básico como alcantarillado y zonas para realizar sus necesidades (INEC, 2017).

2.4 Tratamiento de aguas residuales.

Existen pruebas de tratamiento de aguas residuales desde los antiguos griegos (300 A.C), se muestra que existían canales que transportaban aguas residuales hacia colectores fuera de las ciudades, estas tecnologías las tomaron los romanos más adelante. Ya mucho más adelante en la historia, cerca del siglo XX, las aguas residuales eran vertidas directamente en tierras de agricultura como fertilizante. La idea de que los organismos presentes en las aguas residuales puedan tener un mejor uso, empezó a aparecer (Cooper, 2001).

El proceso de lodos activados fue implementado y desarrollado por primera vez en Reino Unido, con el experimento de un reactor “llenado y vaciado” que tuvo producción de efluentes altamente tratados. El proceso fue llamado “lodos activados”, ya que en esos tiempos se creyó que el lodo recibía un proceso parecido al carbón cuando se activaba (Arden y Lockett, 1914). La demanda de sistemas de tratamiento de aguas residuales continuamente aumenta, centrándose en la remoción de micro contaminantes, que pueden afectar los ecosistemas. La falta de recursos hídricos que se presentará a medida que pase el tiempo, dará paso a que se dé el desarrollo de nuevas tecnologías para tratamiento e incluso que aparezca la reutilización de agua. (Henze, 2017).

Las plantas de tratamiento tienen el objetivo de eliminar contaminantes presentes después del uso que se da a las aguas (Kollmann, Neugebauer, Kretschmer, Truger, y Kind, 2017). Una planta de tratamiento tiene como procesos definidos, que pueden ser primarios, secundarios y terciarios, para llegar a que los parámetros de caracterización de las aguas bajen a niveles aceptables para las descargas al medio ambiente (Surti, 2016).

Los problemas actuales en las plantas de tratamiento de aguas residuales son la deficiente y casi nula capacitación y educación para una nueva generación de ingenieros especializados en el tema, así como expertos que operen y mantengan las plantas de tratamiento de aguas residuales ya implementadas o por implementar. Las estructuras envejecidas, modernización,

desbordamientos, operaciones unitarias obsoletas son otros problemas generales que presenta una planta de tratamiento de aguas residuales (Tchobanoglous, Burton y Stensel, 1991).

2.5 Tratamientos primarios de aguas residuales.

El tratamiento de aguas residuales primario contiene como lo mencionan en García Astillero (2018) tienen procesos fisicoquímicos que tienen como objetivo, reducir el contenido de partículas en suspensión, grasas, aceites, y materiales de tamaño grande presentes en el agua. Se pueden encontrar tratamientos primarios tales como:

- **Sedimentación:** Las partículas que se encuentran caen al fondo por acción simplemente de la gravedad en tanques decantadores.
- **Flotación:** Se retiran contaminantes como espumas, grasas y aceites, por la baja densidad de estos se sitúan sobre la capa superficial del agua, con inyección de aire se pueden eliminar hasta el 75% de estas partículas suspendidas.
- **Neutralización:** Que es la normalización del pH entre un rango de 6-8.5.
- **Otros procesos:** Se pueden aplicar otros procesos estandarizados como fosas sépticas, lagunaje, filtros verdes o procesos químico.

2.5.1 Tratamientos secundarios de aguas residuales.

Los tratamientos secundarios, se basan en la conversión biológica de los sólidos disueltos y compuestos orgánicos en forma de biomasa que, después de este proceso, se elimina por medio de sedimentación. La conversión biológica la realizan microorganismos que están presentes en los sólidos suspendidos. Existen dos métodos para contacto entre bacterias y compuestos orgánicos. El primero es la suspensión de biomasa en el agua residual; mientras el segundo es la adherencia de películas finas de biomasa atrapadas en superficies sólidas.

El método más comúnmente utilizado de suspensión de biomasa es el de “lodos activados”. En este proceso es primordial la recirculación de una porción de biomasa, de este modo aligerando el proceso de reducción biológica. Por otra parte, el método de atrapar biomasa en una superficie sólida se basa en diferentes mecanismos como pueden ser los filtros percoladores, en los cuales, cuando la biomasa se encuentra madura, esta se despega de la superficie y es llevada al clarificador secundario; o, filtros de membrana o reactores de lecho fluidizado móvil, todos estos tienen una alta área superficial (Campos, 2003).

En este trabajo de investigación, se profundizará más acerca de los tratamientos biológicos, específicamente un tratamiento de adhesión de biomasa a un medio sólido como es el de lecho fluidificado móvil o *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR).

2.5.2 Tratamientos terciarios de aguas residuales.

El tratamiento terciario, que también se lo denomina el tratamiento avanzado es cuando se busca llegar a que la calidad del efluente sea superior a la del tratamiento secundario convencional. Muchos de los procesos en esta etapa no se emplean en el tratamiento de aguas residuales, pero está previsto que se haga en un futuro no muy lejano, debido a la calidad de efluentes que se viene requiriendo (Ramalho, 2003). Entre los procesos más comunes como lo describen en la organización Alianza Por el Agua (2006), se encuentran:

- **Eliminación de sólidos en suspensión:** Aquí donde llegan los sólidos que no fueron eliminados en otros procesos anteriores pueden llegar a ser eliminados por medio de micro tamizado (construidos sobre tambores rotativos), filtración y coagulación.
- **Adsorción en carbón activado:** Es la concentración de un soluto en la superficie de un sólido debido al desequilibrio de las fuerzas superficiales. El sólido se denomina adsorbente y el soluto se denomina adsorbato, la capacidad de adsorción depende de la superficie total del material.

- **Intercambio iónico:** Por medio de membranas no porosas con radicales cargados electrostáticamente.
- **Ósmosis inversa:** También llamada hiper filtración, se refiere a aplicar una solución salina a una presión superior a su presión osmótica, forzando a pasar el agua por una capa semi impermeable, separándola de esta manera de las sales que contiene.
- **Electrodiálisis:** Se eliminan aproximadamente un 99% de sólidos disueltos, por medio de cargas eléctricas.
- **Oxidación química (cloración y ozonación):** La utilización de cloro libre como sistema de desinfección y método de eliminación de para cianuros y disminución de los valores de DBO debido a su gran capacidad de oxidación. El ozono, por su parte es oxígeno enriquecido, gracias a su gran poder oxidante ayuda a la reducción de metales disueltos y remoción de materia orgánica.

2.6 Tratamiento biológico de aguas residuales.

El principal objetivo del tratamiento biológico es la remoción de la materia orgánica en las aguas residuales. En los últimos años se han venido implementando otros usos como la nitrificación, desnitrificación y eliminación de fósforo. Todos estos procesos son a base de reacciones ligadas a los microorganismos que crecen utilizando los contaminantes presentes en el agua como fuente de carbono y/o energía que se convierte en biomasa, dióxido de carbono y compuestos inocuos (Todar, 2007).

2.6.1 Procesos que se dan en los tratamientos biológicos.

Los tratamientos biológicos tienen un proceso establecido que se cumple y es de gran importancia, se los describe según (Polo, Torrecillas y Martínez, 2018, p. 7) como:

- **Crecimiento biológico:** Es en donde los microorganismos utilizan moléculas simples como el ácido acético, etanol, metano, glucosa, amonio, para su crecimiento.
- **Hidrólisis:** Las moléculas de gran tamaño se transforman en pequeñas, que son degradables debido a las enzimas extracelulares que producen los organismos. Estos procesos suelen ser los limitantes debido a la cantidad de tiempo que toma en comparación al crecimiento.
- **Desaparición de biomasa (decaimiento):** En este proceso se encuentran los siguientes subprocesos:
 - **Mantenimiento:** Conlleva la energía que se necesita para los diferentes procesos celulares. Cuando estos aportes de energía decrecen, las células obtienen la energía necesaria que está almacenada dentro de las mismas, cuando se acaba la energía almacenada, las células mueren.
 - **Predación:** Donde los organismos superiores empiezan a utilizar organismos más bajos como alimento.
 - **Muerte y lisis:** Se produce una rotura de la pared celular y citoplasma, convirtiéndose las células en sustrato para otros organismos. Los materiales de forma compleja permanecen como residuo orgánico inerte que no se solubiliza, a este residuo se lo llama *debris*.

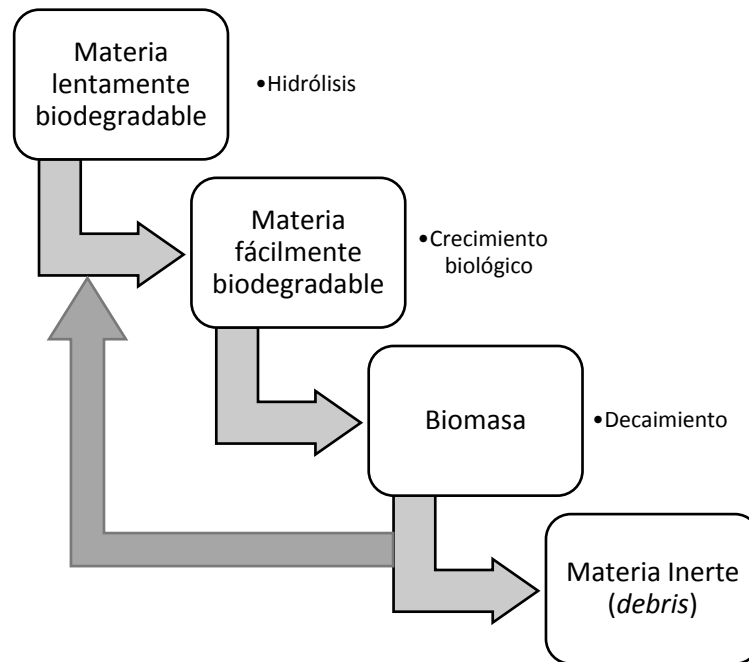


Figura 1. Transformaciones biológicas en plantas de tratamiento.

Adaptado de (Polo, Torrecillas y Martínez, 2018, p. 8).

2.7 Reactores de biopelícula.

Los reactores de biopelícula tienen resultados similares a los procesos de lodos activados, como es la remoción de materia orgánica, nitrificación, desnitrificación y remoción de fósforo. Los reactores de biopelícula también tienen algunas diferencias, como es el proceso de transporte de masa, el cual es relativamente limitado, ya que únicamente las bacterias que se encuentran en la capa superficial de la biopelícula están en contacto con el agua y eliminan el sustrato. Por otra parte, las bacterias que se encuentran más cercanas a la superficie de contacto tienen menos probabilidad de desprendimiento.

Todos los biorreactores tienen que cumplir características como: (i) La retención de microorganismos en base a un soporte, en lugar de la separación sólido líquido y la recirculación como es en los lodos activados; (ii) El agua que contiene los contaminantes permanece en contacto con la biopelícula, de esta manera las condiciones de mezclado y turbulencia determinan la eficiencia del

reactor; (iii) El crecimiento y desprendimiento debe estar balanceado para no permitir la obstrucción del reactor; y, (iv) Si es necesario se adicionan elementos que puedan ayudar a la eficiencia del sistema como electrones, aceptores, nutrientes o alcalinidad.

La clasificación de los biorreactores puede ser en tres grandes grupos, tales como: (i) los sistemas no sumergidos, por ejemplo, los filtros percoladores y reactores biológicos rotativos; (ii) reactores de biopelícula sumergida de lecho fijo de flujo ascendente o flujo descendente; y, (iii) los reactores de lecho fluidizado móvil.

2.8 Reactores de biopelícula de lecho móvil (MBBR).

Los reactores de biopelícula de lecho fluidizado móvil o *Moving bed biofilm reactor* (MBBR), utilizan medios de soporte normalmente fabricados con un área superficial específica alta por unidad de volumen, la densidad que tienen debe ser cercana a la del agua. La biomasa que se encuentra en dicho reactor se mantiene en suspensión utilizando poca cantidad de energía por medio de aireación o mezclado mecánico (Odegaard, 2006). Los sistemas MBBR pueden operar sin recirculación de lodos como es el tratamiento tradicional. El tiempo de retención de biomasa en los reactores es limitado debido a la cantidad de biomasa que se retiene en los medios de soporte (Henze, 2017).

En principio, se empleaban procesos con lecho fijo, los cuales presentaron algunos inconvenientes en cuanto a su operación y mantenimiento ya que el lecho presentaba obstrucción debido a la gran cantidad de biomasa que crece, requiriendo una limpieza de dicha biomasa de forma periódica, gracias al movimiento que se crea con el lecho móvil se han eliminado y facilitado estos procesos (Zalakain y Manterola, 2011).

La biopelícula que crece en las partes más cercanas al soporte hace que entren en procesos de anaerobiosis, permitiendo que de esta manera se desprenda de forma automática; haciendo que de esta manera solo exista la

biopelícula requerida por la carga de contaminante. Gracias a este proceso la recirculación de lodos no es necesaria en el reactor, simplificando el proceso (Zalakain y Manterola, 2011).

Según Odegaard (2000), la característica fundamental en los reactores MBBR, son los soportes plásticos, debido a su geometría, tamaño y materiales de construcción, estas características son tomadas en cuenta para maximizar la eficiencia. Esta es la herramienta clave para diferenciar entre el proceso de lodos activados, donde la eficiencia del tratamiento está más directamente atada al volumen del reactor.

En los lechos fluidizados móviles o MBBR, el volumen del reactor puede incrementar o disminuir tomando en cuenta variables como el diseño del área superficial de los soportes plásticos o a su vez añadiendo una mayor cantidad de estos en el reactor. Esta característica permite la flexibilidad para futuros repotenciones a plantas ya establecidas, donde tienen una operación unitaria de lodos activados, se puede añadir esta tecnología sin la necesidad de construir estructuras adicionales (Odegaard, 2000).

El principio de operación del lecho fluidizado móvil, MBBR se refiere a una mezcla continua, a través de un proceso que se basa en el crecimiento de biopelícula en los soportes plásticos, este proceso combina los beneficios de los sistemas de lodos activados y de lecho fijo biológico, eliminando las desventajas de estos. El lecho fluidizado móvil MBBR tiene el crecimiento de la biomasa en los soportes plásticos que se mueven en el reactor biológico por agitación generada por difusores de aire (reactores aerobios) o sistemas mecánicos (reactores anaeróbicos anóxicos) (Gulhane y Kotangale, 2013).

El sistema MBBR está siendo últimamente utilizado por que, debido a la cantidad de área superficial que se presenta en el reactor, permite un crecimiento significativo de biomasa, esto quiere decir que un reactor puede estar en funcionamiento con altas cargas o variaciones en las mismas y otros problemas que pueden traer las aguas residuales en un volumen de reactor

relativamente pequeño (Gulhane y Kotangale, 2013). Existen diferentes alternativas de proceso de tratamiento de aguas residuales a partir del MBBR, que se explican en la siguiente figura:

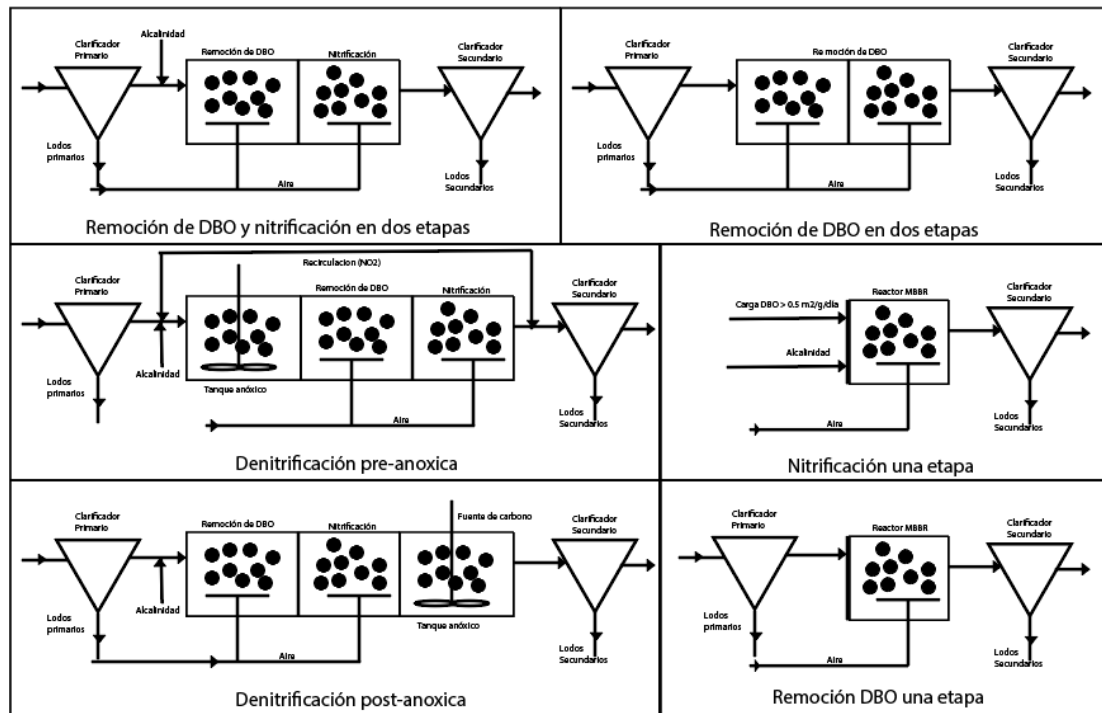


Figura 2. Tratamiento de aguas residuales procesos alternativos MBBR.

Adaptado de (Bengston, 2017).

Para este proyecto se utilizará el proceso de una sola etapa para remoción de DBO/DQO, el cual puede ser utilizado como un proceso complementario independiente o como un tratamiento antes de otro proceso de tratamiento secundario en caso de tener cargas altas. En algunos casos se utiliza como un proceso para aliviar la sobrecarga de contaminantes antes de otro tratamiento secundario ya existente (Bengston, 2017).

2.8.1 Ventajas del tratamiento MBBR.

En comparación frente a procesos convencionales de tratamiento biológico, el MBBR requiere un menor volumen del tanque, debido a que estos

proporcionan una superficie específica alta. Son procesos con gran porcentaje de flexibilidad, es decir, si se necesita mayor área superficial se pueden agregar más soportes plásticos, no se recomienda un llenado del reactor de más del 70% o, de igual manera, se puede aumentar el área superficial con la selección de otro material. El sistema MBBR tampoco requiere de recirculación de los lodos, eliminando el problema que tienen los sistemas tradicionales (Zalakain y Manterola, 2011).

El mantenimiento y operación de estos reactores es relativamente fácil, ya que no requieren control de purga de fangos y la limpieza no requiere que sea de forma periódica. La biomasa cuando se ve amenazada por mucha carga de contaminantes, tiene la capacidad de regeneración rápida ya que solo se afectarían las capas superficiales de la biopelícula, dejando que las capas más cercanas a los soportes sean las que actúen para depurar las aguas con cargas contaminantes (Zalakain y Manterola, 2011).

2.8.2 Desventajas del tratamiento MBBR.

Al momento, ya que es una tecnología relativamente nueva para el tratamiento y ya que alrededor del mundo se encuentran aproximadamente unas 800 plantas de tratamiento que actúan con esta tecnología, no se han encontrado desventajas operativas, se pueden describir algunas como el mayor consumo energético debido a la cantidad de aeración que necesita, mayor costo en instalación, porque los insumos como los soportes plásticos tienen un costo por m³ relativamente alto (Mosey, 2006).

2.9 Crecimiento de biopelícula en el reactor MBBR.

La biopelícula es definida como: comunidades complejas de microorganismos con sustancias poliméricas extracelulares. Estas comunidades contienen polisacáridos, producidos por las bacterias que se encuentran adheridas a una superficie viva o inerte, estas estructuras crean huecos intersticiales donde fluyen los micronutrientes (Rodríguez, 2001). La biopelícula es muy dinámica

en torno a su composición y características que varían según la necesidad y con el tiempo, influenciando la actividad con el medio acuoso inmediato (Eighmy y Maratea, 2012).

El crecimiento de la biopelícula en el reactor según Barros de Macedo (2000) se da específicamente en los soportes plásticos por la acción bacteriana que se cita en la siguiente teoría que se da en cinco etapas que son:

- El acondicionamiento de la superficie para adsorción de materia orgánica.
- Transporte de las células y los nutrientes al sitio de adherencia.
- Por acción electrostática, comienza el proceso de adherencia de las bacterias a los medios de soporte, este proceso todavía es reversible.
- La adherencia bacteriana se vuelve irreversible y comienza la colonización y crecimiento celular en los soportes plásticos.
- La alta actividad metabólica y liberación de células presentes en las partes externas de los soportes se presenta en la biopelícula ya formada.

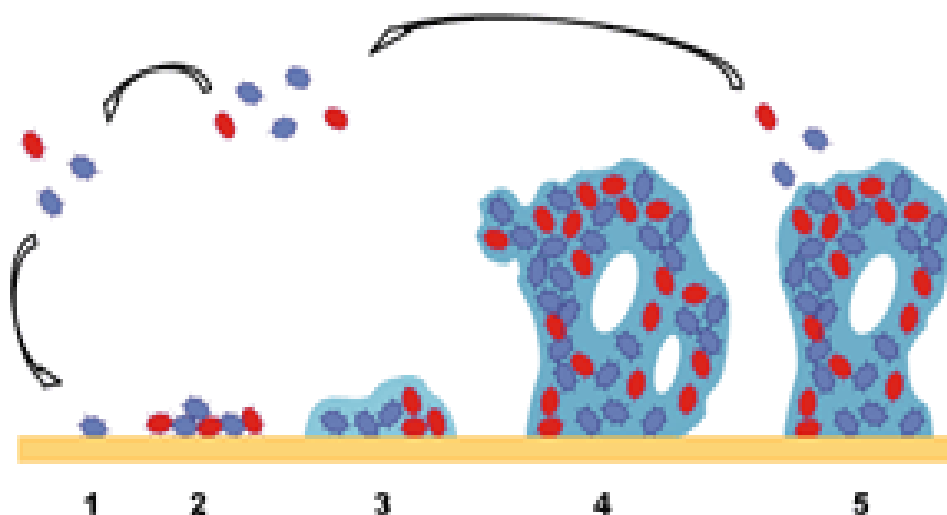


Figura 3. Fases de formación de una biopelícula.

Tomado de (Téllez, 2010).

3. METODOLOGÍA.

3.1 Diseño.

Para las dimensiones y construcción del tanque de tratamiento biológico de lecho móvil, se consideró los siguientes parámetros en base empírica: Primeramente el parámetro de diseño principal es el DBO, el área superficial de los soportes plásticos a utilizar, el porcentaje que ocuparon los soportes plásticos en el reactor, el caudal de agua a tratar de entrada al reactor, el valor aproximado de DBO_5 en el agua residual, y el factor clave para el diseño es la tasa de carga por superficie de área: *Surface Area Loading Rate* (SARL) que es expresado en $\text{g/m}^2\cdot\text{día}$, esto significa que, los g/día de DBO que ingresa al tanque MBBR por m^2 de área de superficie en los soportes plásticos (Bengston, 2017).

Según metodología estudiada a partir de (Bengston, 2017) (Rusten, 2016) (Odegaard, 2006), se determinó que las variables anteriormente expuestas expresan una línea base para el dimensionamiento del tanque de reactor MBBR, el cual expresó y se realizó los cálculos de largo, ancho, altura, y tiempo de retención hidráulico.

3.2 Cálculos para el dimensionamiento.

Los cálculos para del dimensionamiento del tanque fueron empíricos y los parámetros que se tomaron en cuenta fueron: caudal de entrada, DBO_5 de entrada, SARL. Los parámetros controlados, que se tomaron de forma arbitraria, para el volumen requerido del tanque fueron la superficie de área de los soportes plásticos, la altura de líquido en el tanque, la cantidad de relleno a ser introducido en el tanque y finalmente, la proporción largo y ancho del tanque (L:W).

Carga diaria de DBO₅.

$$DBO_d = Q \cdot DBO_5 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

DBO_d = Carga diaria de DBO₅ (g/día)

Q = Caudal de entrada. (m³/día)

DBO_5 = Carga de DBO de entrada. (g/m³)

Área superficial requerida de soporte plástico.

$$CS = \frac{DBO_d}{SALR} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

CS = Área superficial requerida (m²)

DBO_d = Carga diaria de DBO₅ (g/día)

$SALR$ = Carga superficial por unidad de área. (g/m². día)

Volumen de soporte plástico calculado.

$$V_{sp} = \frac{CS}{As} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

V_{sp} = Volumen de soporte plástico requerido (m³)

CS = Área superficial requerida (m²)

A_s = Área superficial del soporte plástico. (m^2/m^3)

Volumen total del tanque.

$$V_{tt} = \frac{V_{sp}}{\%F} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

V_{tt} = Volumen del tanque (m^3)

V_{sp} = Volumen de soporte plástico requerido (m^3)

$\%F$ = Porcentaje de llenado de soporte plástico en el reactor.

Volumen de agua residual en el tanque.

$$V_a = V_{tt} - (V_{sp}(1 - E)) \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

V_a = Volumen de líquido en el tanque (m^3)

V_{tt} = Volumen del tanque (m^3)

V_{sp} = Volumen de soporte plástico requerido (m^3)

E = Espacio vacío de soporte plástico.

Ancho del tanque.

$$W = \sqrt{\frac{V_a}{R.H}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

W = Ancho del tanque (m)

Va = Volumen de agua residual en el tanque (m^3)

R = Proporción Largo-Ancho (L:W)

H = Altura de agua residual (m)

Largo del tanque.

$$L = \frac{Va}{W.H} \quad \text{(Ecuación 7)}$$

Donde:

L = Largo del tanque (m)

W = Ancho del tanque (m)

Va = Volumen de agua residual en el tanque (m^3)

H = Altura de agua residual (m)

Tiempo de retención hidráulico.

$$T = \frac{Va}{Q} \quad \text{(Ecuación 8)}$$

Donde:

T = Tiempo nominal de retención hidráulica (s)

Va = Volumen de agua residual en el tanque (m^3)

Q = Caudal de entrada. ($m^2/día$)

3.3 Construcción del tanque y estructura.

Se diseñó para un caudal de 40 l/min, con la superficie específica de área de los portadores plásticos de $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$, y el DBO_5 de entrada aproximado de 120 mg/l, para este estudio se escogió un valor de SARL de $50 \text{ g}/\text{m}^2/\text{día}$. La construcción del tanque fue realizada en acrílico de 9 mm de espesor, que permite la visualización del proceso MBBR, dentro del tanque se colocó el 50% de relleno plástico y dos difusores de aire de burbuja fina de 12 pulgadas como medio de aireación anexados a un tubo galvanizado de 3 pulgadas de ancho.

En la parte superior del tanque, se hicieron dos orificios de entrada de 3 pulgadas y se optó por una altura de seguridad de 10 cm, en la parte inferior del tanque se agregó una tubería con tapón de PVC de 1 ½ pulgadas, la unión de los acrílicos se hizo en base a cloruro de metilo, que permite la soldadura de las partes y para la impermeabilización, se usó silicona acrílica de alta resistencia, finalmente para la estructura metálica se utilizó tubo cuadrado de hierro galvanizado de ¼ de pulgada de espesor.

3.4 Pruebas hidráulicas.

3.4.1 Pruebas de estanqueidad.

Las pruebas de estanqueidad para la comprobación de resistencia y verificación de que no existan fugas se llevaron a cabo en el laboratorio de Ingeniería Ambiental (LQ5) de la Universidad de las Américas, Campus Querí, primeramente, se llenó el tanque reactor prototipo a un aproximado de 90% de su capacidad para comprobar las características antes descritas.

Una vez que se realizó el llenado del tanque con agua, se realizó la comprobación de la resistencia de la estructura metálica, que no exista desplazamiento del tanque de acrílico, y finalmente, la existencia de fugas para su sellado con cloruro de metilo en las partes identificadas y con silicona acrílica como refuerzo.

3.4.2 Pruebas de funcionamiento.

Las pruebas de funcionamiento se realizaron después de haber comprobado las pruebas de estanqueidad, en donde ya se verificó y se selló las posibles fugas que se encontraron. Una vez realizado estos chequeos, se procedió a llenar el tanque con el soporte plástico calculado y se llenó de agua hasta la capacidad máxima de diseño del tanque.

Se realizó la comprobación de la flotación de los soportes plásticos en el reactor, para lo cual, una vez lleno dicho tanque, con un compresor se procedió a realizar la inyección de aire, paralelamente comprobando que no existieron fugas de aire en el tubo de soporte, solamente existiendo salida de aire por el área útil de los difusores de burbuja fina; finalmente ya comprobado esto, se procedió con la verificación del movimiento de los soportes plásticos que pudieron realizar la fluidización del reactor gracias a la inyección de aire, que provocó que los soportes plásticos floten libremente por todo el tanque.

3.5 Recolección de agua para pruebas de tratabilidad.

Por limitaciones en la instalación definitiva del prototipo en el área de funcionamiento final, se optó por realizar una prueba *batch* en laboratorio a fin de verificar el inicio de la formación de biopelícula en los soportes plásticos, utilizando agua residual de tipo doméstico. La recolección de agua residual fue realizada en la planta de tratamiento de aguas residuales ubicado en la sede Udlapark de Nayón, directamente en la entrada del afluente, para estos análisis la recolección fue de un litro de agua residual para la caracterización de entrada de las aguas residuales, y, también se recolectó un litro para realizar el tratamiento en base a los cálculos realizados con una pequeña bomba de aire para la inyección de oxígeno al tratamiento y su posterior caracterización.

3.6 Caracterización fisicoquímica.

Primero se obtuvo una línea base de caracterización de aguas a tratar antes del procedimiento, realizado en el agua pertinente para el tratamiento y se desarrollaron los análisis fisicoquímicos. Los parámetros analizados fueron DQO, DBO₅, turbidez, pH y determinación de sólidos totales, disueltos, suspendidos, volátiles y fijos, por método gravimétrico.

3.6.1 Medición de pH.

Para la medición del pH, se utilizó el equipo multiparámetro que dispone el laboratorio de Hanna Instruments HI 2550, que tiene en consideración parámetros como: pH, ORP, temperatura, y conductividad eléctrica. Esta medición se encuentra basada en el método electroquímico debido al empleo de una sonda potenciométrica (HannaInstruments, 2018).

3.6.2 Turbidez.

También se realizó la medición de turbidez, con el equipo *NANOCOLOR* (espectrofotómetro) el cual mide la turbidez nefelométrica de una muestra por difusión de luz en un ángulo de 90°.

3.6.3 DQO.

La caracterización de DQO, se realizó con la ayuda del Kit de reactivos *NANOCOLOR*, DQO, ya que las muestras tuvieron un valor menor a 600 mg/l este procedimiento se basa en colocar 2 ml de muestra en el tubo de test con el reactivo agitarlo y colocarlo en el bloque calentador a 160°C durante 30 minutos, después de que el tiempo transcurrió, se dejó enfriar y poner la muestra en el equipo de medición *NANOCOLOR*.

3.6.4 DBO₅.

La medición de este parámetro fue mediante el equipo "OXITOP IS 6". Como primer paso, se determinó el volumen de la muestra mediante la siguiente tabla, a partir del resultado de DQO obtenido, en la tabla 2 se muestra las cantidades para el análisis y el factor por el que se multiplicó.

Tabla 2.

Medición de DBO₅ a partir de resultado de DQO.

Volumen de muestra (ml)	Resultado DQO (mg/l)	Factor
432	0-40	1
365	41-80	2
250	81-200	5
164	201-400	10
97	401-800	20
43.5	801-2000	50
22.7	2001-4000	100

Se colocó el volumen calculado de muestra en la botella de vidrio ámbar del equipo, y se colocó en los capuchones dos perlas de hidróxido de sodio, y alrededor de 9 gotas de una solución inhibidora de nitrificación, luego se precedió a tapar las botellas con los cabezales Oxitop, se los encendió para el comienzo de la medición y se coloca en la incubadora a 15°C, para finalmente en los 5 días determinar el valor de DBO₅ de las aguas muestras.

3.6.5 Determinación de sólidos.

La determinación de sólidos se dio en base a la guía de prácticas de laboratorio que está basada en el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. (American Public Health Association, 1992).

Determinación de sólidos sedimentables.

Se vertió 1 litro de muestra homogenizada en el cono *Imhoff*, se dejó reposar para su sedimentación por 1 hora, y se leyó el volumen en la escala del cono.

Determinación de sólidos totales.

Se tomó el volumen del agua homogenizada y se ingresó en el crisol ya preparada a la estufa a 105°C durante 3 horas, después de este tiempo se dejó enfriar y secar, para su posterior pesado.

$$ST = 10^6 \frac{A-B}{C} \quad \text{(Ecuación 9)}$$

Donde:

A = Peso del recipiente sólido seco (g)

B = Peso del recipiente vacío (g)

C = Volumen de la muestra (ml)

Determinación de sólidos suspendidos totales.

Para la determinación de sólidos suspendidos totales, se pesó el papel filtro, se colocó en el equipo de filtración con una muestra representativa, luego el papel filtro se colocó en un crisol ya preparado, para su secado y posterior pesado.

Determinación de sólidos totales volátiles.

Se colocó el contenido de la muestra secada a 105°C, en la mufla calcinada a 550°C dividido para el volumen de la muestra analizada.

Determinación de sólidos totales fijos.

Es la diferencia del peso de la muestra calcinada a 550°C y el peso del crisol tarado sin muestra.

Sólidos Disueltos.

$$SD = 10^6 x \frac{D-E}{F} \quad \text{(Ecuación 10)}$$

Donde:

D = Peso del recipiente sólido seco (g)

E = Peso del recipiente vacío (g)

F = Volumen de la muestra (ml)

Sólidos suspendidos.

$$SS = 10^6 \frac{G-H}{I} \quad \text{(Ecuación 11)}$$

Donde:

G = Peso del recipiente sólido seco (g)

H = Peso del recipiente vacío (g)

I = Volumen de la muestra (ml)

Sólidos volátiles.

La diferencia entre sólidos totales y sólidos fijos son los sólidos volátiles

$$SST = \text{Sólidos Fijos} - \text{Sólidos Volátiles} \quad \text{(Ecuación 12)}$$

4. RESULTADOS.

4.1 Cálculos para dimensionamiento.

Cálculos para el diseño proceso MBBR (Unidades Sistema Internacional).
Proceso de una etapa para remoción de DBO.

4.1.1 Entradas generales.

Caudal de entrada para el diseño.

$$Qb = 40 \frac{l}{min}$$

$$Qb = 57,3 \frac{m^3}{día}$$

DBO₅ de entrada.

$$DBO_5 = 120 \frac{mg}{l}$$

SARL (Carga superficial por unidad de área).

$$SARL = 50 \frac{g}{m^2 día}$$

4.1.2 Cálculos para volumen de soporte plástico y dimensiones para el volumen del tanque.

Área específica superficial del soporte plástico.

$$As = 500 \frac{m^2}{m^3}$$

Porcentaje de llenado de soporte plástico en el reactor.

$$\%F = 50\%$$

Profundidad de agua residual en el tanque.

$$H = 0,55m$$

Relación L:W del tanque.

$$R = 1,5$$

Espacio vacío de soporte plástico.

$$E = 100\% - \%F$$

$$E = 100\% - 55\%$$

$$E = 50\%$$

- **Cálculos.**

Carga diaria de DBO₅.

$$DBOd = Q \cdot DBO_5$$

$$DBOd = 57.3 \frac{m^3}{día} \cdot \left(120 \frac{mg}{l} \frac{1000 l}{m^3} \frac{1 g}{1000 mg} \right)$$

$$DBOd = 6912 \frac{g}{día}$$

Área Superficial de soporte plástico requerida.

$$CS = \frac{DBOd}{SARL}$$

$$CS = \frac{6912 \frac{g}{día}}{50 \frac{g}{m^2 día}}$$

$$CS = 138,2 m^2$$

Volumen de soporte plástico calculado.

$$V_{sp} = \frac{CS}{As}$$

$$V_{sp} = \frac{138,2 m^2}{500 \frac{m^2}{m^3}}$$

$$V_{sp} = 0,27 m^3$$

Volumen del tanque.

$$V_{tt} = \frac{V_{sp}}{\%F}$$

$$V_{tt} = \frac{0,35 m^3}{0,55}$$

$$V_{tt} = 0,55 m^3$$

Volumen de líquido en el tanque.

$$V_a = V_{tt} - (V_{sp}(1 - E))$$

$$Va = 0,63 \text{ m}^3 - (0,35 \text{ m}^3(1 - 0,45))$$

$$Va = 0,41 \text{ m}^3$$

Ancho del tanque.

$$W = \sqrt{\frac{Va}{R.H}}$$

$$W = \sqrt{\frac{0,44 \text{ m}^3}{1,5 * 0,40 \text{ m}}}$$

$$W = 0,71 \text{ m}$$

Largo del tanque.

$$L = \frac{Va}{W.H}$$

$$L = \frac{0,44 \text{ m}^3}{0,85 \text{ m} * 0,40 \text{ m}}$$

$$L = 1,10 \text{ m}$$

Tiempo de retención hidráulico.

$$T = \frac{Va}{Q}$$

$$T = \frac{0,44 \text{ m}^3}{57,3 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}$$

$$T = 0,0077 \text{ día} \left(\frac{1440 \text{ min}}{1 \text{ día}} \right)$$

$$T = 10,4 \text{ min}$$

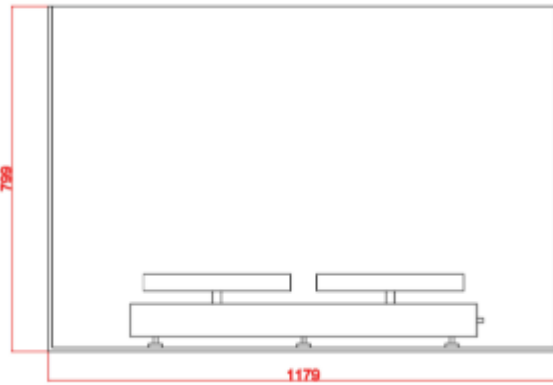
Tabla 3.

Resumen de resultados del dimensionamiento y variables para el tanque reactor MBBR.

Variable	Símbolo	Unidad	Valor
Caudal de entrada para el diseño	Qb	m ³ /día	57,3
DBO ₅ de entrada	DBO ₅	mg/l	120
SARL (Carga superficial por unidad de área.)	SARL	g/m ² .día	50
Área superficial por unidad de área (soporte plástico)	As	m ² /m ³	500
Porcentaje de llenado de soporte plástico en el reactor	%F	%	50
Profundidad de agua residual en el tanque	H	m	0,55
Relación L:W del tanque	R	-	1,5
Espacio vacío de soporte plástico	E	%	50
Carga diaria DBO ₅	DBOd	g/día	6912
Área superficial de soporte plástico requerido	CS	m ²	138,2
Volumen de soporte plástico	Vsp	m ³	0,27
Volumen del tanque	Vtt	m ³	0,55
Volumen de líquido en el tanque	Va	m ³	0,41
Ancho del tanque	W	m	0,71
Largo del tanque	L	m	1,10
Tiempo de retención hidráulico	T	min	10,3

4.2 Modelo de AutoCAD.

Vista Lateral



Vista Frontal

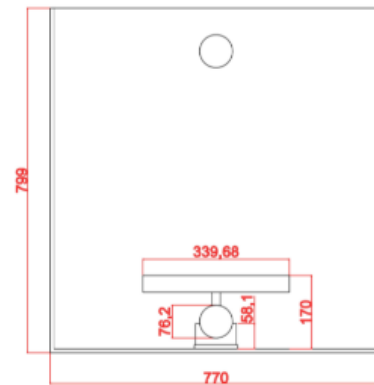


Figura 4. Corte Lateral y Frontal del tanque reactor MBBR.

Vista Superior

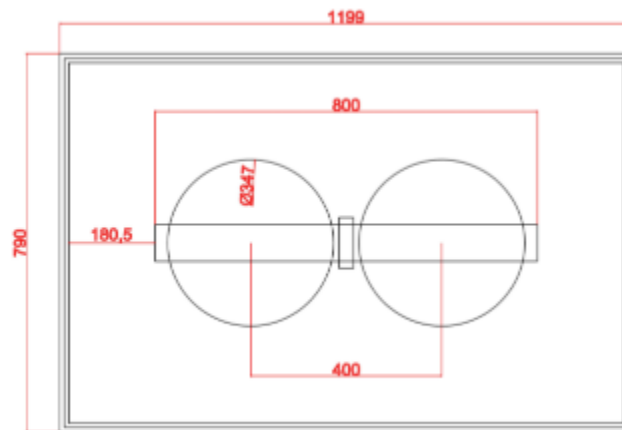


Figura 5. Corte superior del tanque reactor MBBR.

Modelo 3D

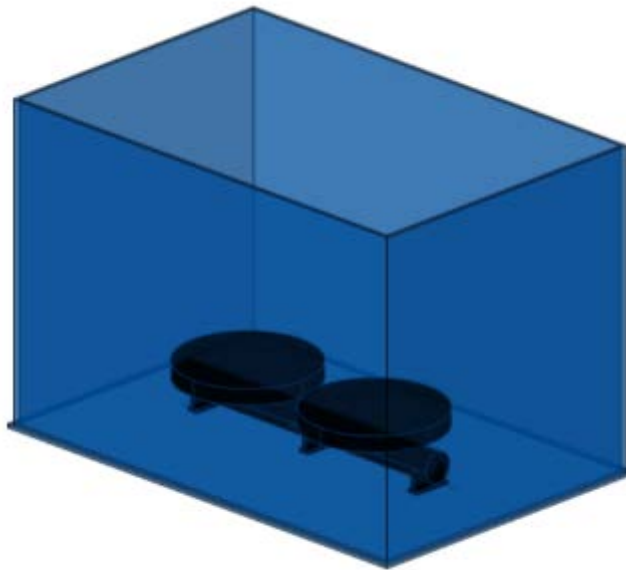


Figura 6. Modelo 3D en AutoCAD del tanque reactor MBBR.

4.3 Pruebas hidráulicas.

4.3.1 Pruebas de estanqueidad.

Para la determinación de las pruebas hidráulicas, primeramente se comprobó por pruebas de estanqueidad en la cual se llenó el tanque a un 90% de su capacidad total, después de haber realizado algunas pruebas en las que se presentaron fugas, las cuales fueron selladas y se pudo comprobar que dejando en reposo el agua que no existieron fugas, y que la estructura metálica tuvo la respectiva resistencia, para no permitir que las paredes del tanque reactor cedan, además, se comprobó que el soporte donde se encuentran los difusores de aire de burbuja fina, estén completamente sellados y no existieron filtraciones de afuera hacia dentro de agua como se puede evidenciar en la figura 7.



Figura 7. Pruebas es estanqueidad, tanque lleno de agua al 70%.

4.3.2 Prueba de funcionamiento del tanque.

Se determinó el funcionamiento del tanque reactor, primeramente se llenó con la cantidad calculada de soporte plástico, una vez lleno el tanque del soporte plástico se procedió a ingresar agua para las pruebas de fluidización del tanque, ingresando como prueba número 1, con un compresor de capacidad de 50 litros, a una presión de 115 psi, durante 5 minutos, el caudal de inyección de aire que provee dicho compresor fue de 120 l/min, los soportes plásticos llegaron a moverse, siendo fluidificado un aproximado de 50% del mismo, debido a que un tercio del reactor está lleno de soporte plástico.

La inyección de aire fue realizada mediante el compresor y la manguera en donde se comprobó que solo existe salida de aire por medio de los difusores

instalados. En la figura 8 se puede observar la inyección de aire permitiendo que los soportes plásticos se muevan libremente.

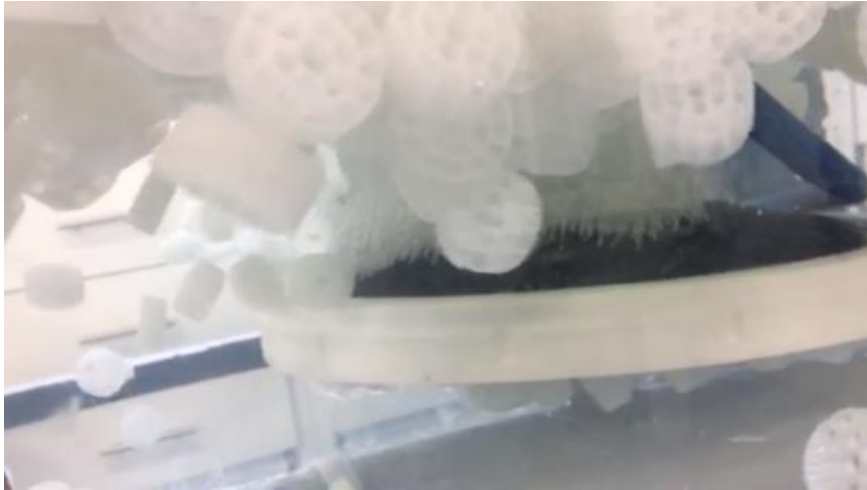


Figura 8. Inyección de aire en el tanque reactor para fluidización.

El reactor funcionó en la última prueba con un total de 50% de soporte plástico dentro del tanque, en el cual, con la misma inyección de aire, el agua procedió a tener una acción de fluidización y mezclarse libremente con los soportes plásticos, gracias a acción de los difusores de burbuja fina implementados, como se muestra en la figura 9.



Figura 9. Fluidización del reactor de lecho móvil (MBBR), con todos sus componentes, agua soporte plástico e inyección de aire.

4.4 Pruebas de tratabilidad.

Se obtuvo inicialmente para las pruebas de tratabilidad en un vaso de precipitación de un litro de volumen con el 50% de soportes plásticos llenado, e inyectado con aire desde una pequeña bomba, tal como se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Prueba de tratabilidad realizada para el crecimiento de biopelícula.

Finalmente, después de 6 días de iniciadas las pruebas de tratabilidad realizadas, se obtuvo un pequeño crecimiento de biopelícula en los soportes plásticos, la cual realiza el papel de remoción de contaminantes y se pudo observar el agua tratada tuvo aparentemente un cambio en la turbidez, lo que evidencia que el tratamiento se está realizando.

4.5 Caracterización de agua residual inicial y final.

Para los parámetros iniciales una vez tomada la muestra de agua residual de la PTAR, se obtuvieron los siguientes valores mostrados en la Tabla 3, los cuales los de mayor relevancia serán los resultados en DBO, DQO y turbidez:

Tabla 3.

Parámetros iniciales del agua residual

Caracterización de agua residual en la entrada		
Parámetro	Unidad	Valor
pH		8.6
Color	Pt:Co	<600
Turbidez	NTU	120.6
Temperatura	°C	17
DQO	mg/l	230
DBO ₅	mg/l	115
ST	mg/l	650
SST	mg/l	180
SDT	mg/l	350
SF	mg/l	440
SVT	mg/l	30

Los parámetros del agua residual tomados después de seis días de tratamiento *batch* realizado en el laboratorio, fueron los siguientes que se muestran en la tabla 4 con los cuales los datos pueden ser tabulados para obtener la eficiencia de remoción de cada uno de los contaminantes valorados al inicio.

Tabla 4.

Parámetros después del tratamiento del agua residual.

Caracterización de agua residual en la entrada		
Parámetro	Unidad	Valor
pH		8.4
Color	Pt:Co	169
Turbidez	NTU	1.7
Temperatura	°C	17

DQO	mg/l	70
DBO ₅	mg/l	36
ST	mg/l	120
SST	mg/l	10
SDT	mg/l	50
SF	mg/l	100
SVT	mg/l	10

Los valores que no tuvieron un cambio representativo en las 2 muestras fueron los de pH de 8.6 a 8.4 y temperatura que se mantuvo a la del ambiente de 17°C, el valor de mayor cambio fue de turbidez, y los valores de DQO, DBO₅, y sólidos son los que tuvieron un cambio que muestra que el tratamiento está siendo realizado.

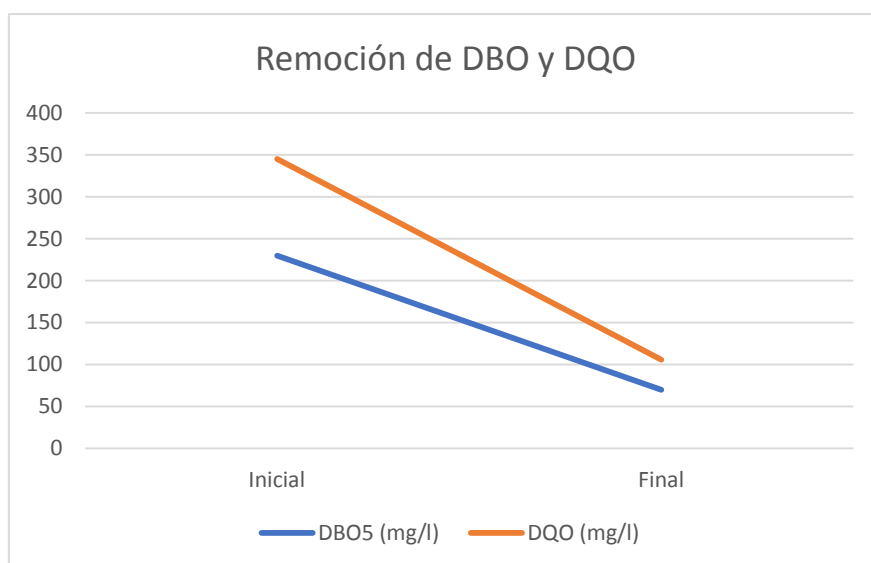


Figura 11. Remoción de DBO₅ y DQO, tomados al inicio y al final del tratamiento.

Como se puede ver en la figura 11, el tratamiento tuvo una remoción de DBO₅ de un parámetro inicial de 115 (mg/l O₂) y un final de 36 (mg/l O₂) teniendo una eficiencia de remoción de 69.6%, en el caso del DQO el parámetro inicial fue

de 235 (mg/l O₂) y el final de 70 (mg/l O₂), demostrando una eficiencia del 68.7%.

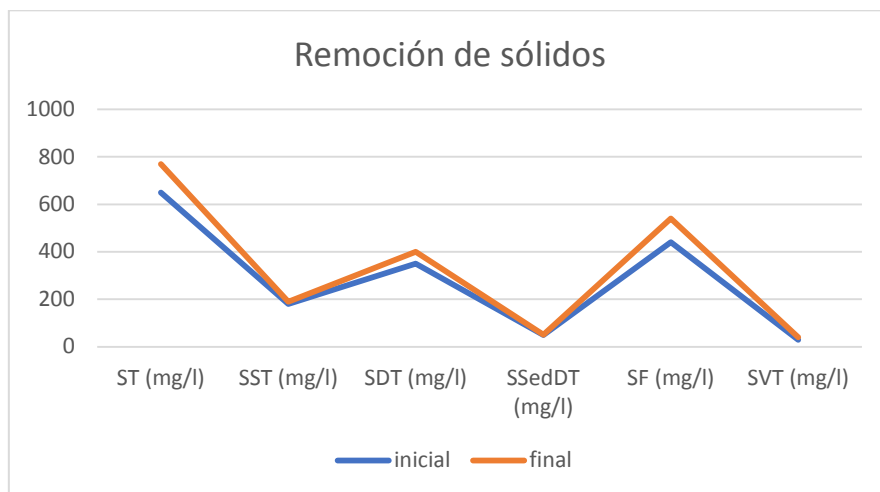


Figura 12. Remoción de sólidos totales, disueltos, suspendidos, volátiles y fijos, tomados al inicio y al final del tratamiento.

Los porcentajes de remoción de sólidos totales, disueltos, suspendidos, volátiles y fijos son: 81.5%, 94.4%, 85.7%, 77.3% y 66.7% respectivamente, en conjunto con la sedimentación dentro del proceso realizan dicha remoción de sólidos en la experimentación, todo esto se encuentra descrito en la figura 12.

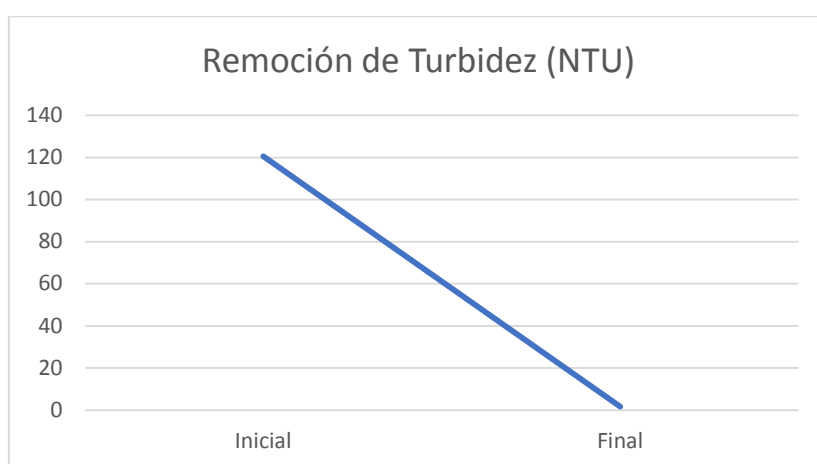


Figura 13. Remoción de sólidos totales, disueltos, suspendidos, volátiles y fijos, tomados al inicio y al final del tratamiento.

Como se puede observar en la figura 13, la turbidez inicial fue de 120.6 NTU, la turbidez final después de los seis días de tratamiento llegó a tener un valor de 1.7 NTU, lo que indica una remoción del 98.6% este fue el parámetro de mayor remoción en el tratamiento.

Finalmente, en la figura 14 se puede observar el pequeño crecimiento de la biopelícula en los soportes plásticos, lo que hará esta biopelícula ya en un el proceso continuo, como para el que fue diseñado el reactor MBBR tendrá una eficiencia mayor de remoción de contaminantes y un mayor crecimiento de biopelícula debido al tiempo de tratamiento que recibirá el agua residual tipo doméstica.

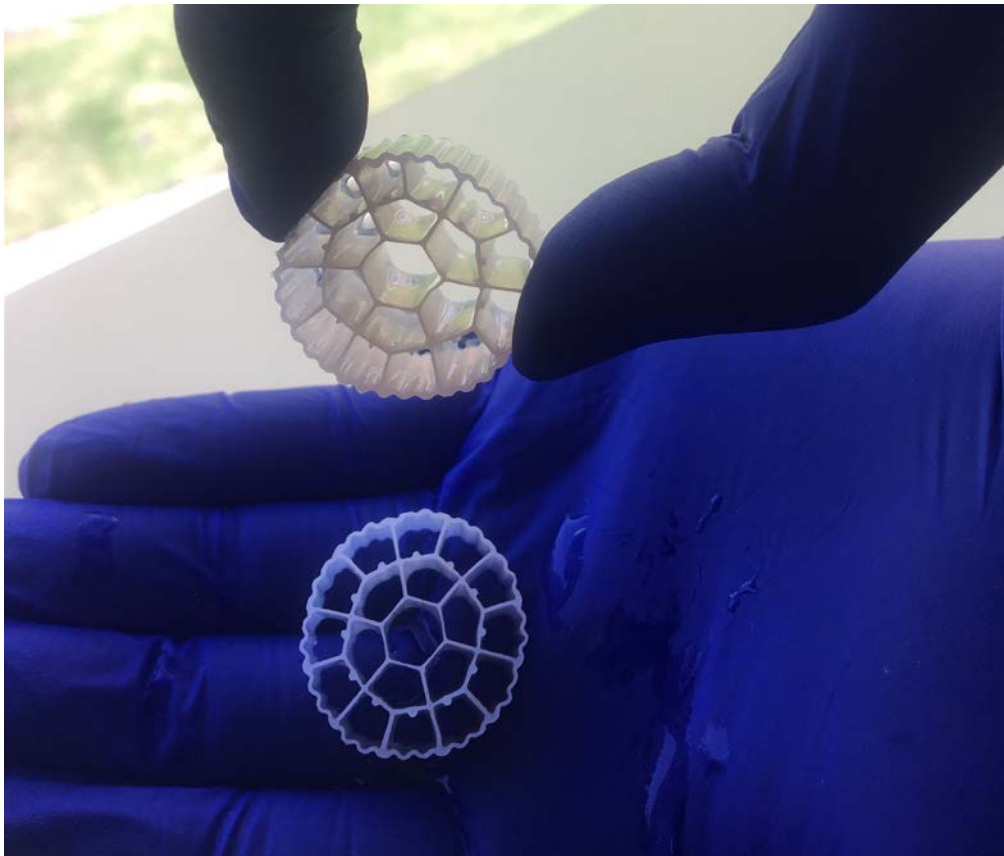


Figura 14. Soportes plásticos luego de seis días de tratamiento con un pequeño crecimiento de biopelícula.

Según la ficha técnica que se encuentra en el Anexo 10 que se refiere a los soportes plásticos la biopelícula en presencia de latas cargadas orgánicas crecerá de 3 a 15 días, el cual dependerá de los factores ambientales a los que se encuentran, también poseen una eficiencia de remoción de DBO y DQO de 2000 hasta 1000 g/m³día gracias a estas características es que la remoción puede ser efectiva.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se concluyó que, a pesar de que el dimensionamiento del prototipo tiene una base empírica, el reactor MBBR tiene un diseño más eficiente en comparación a otras tecnologías de lodos activados, ya que se puede evidenciar que, gracias a los soportes plásticos, el tamaño del tanque reactor se reduce considerablemente teniendo en cuenta la gran área superficial que estos presentan de $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

El material acrílico con el que fue construido el reactor es un material resistente, el cual además permite observar el proceso de tratamiento que ocurre dentro del mismo, este material es de 9 mm de espesor lo que proporciona alta resistencia y un tiempo de vida útil relativamente largo. La ventaja del tanque prototipo realizado con este material permite realizar un estudio pertinente del funcionamiento de esta tecnología. La estructura metálica permite que las paredes del tanque no cedan y de esta manera no permitir fugas futuras durante su uso.

El tanque reactor tiene un volumen total de $0,55 \text{ m}^3$, de los cuales $0,41 \text{ m}^3$ es el volumen de líquido a tratar y el restante $0,27 \text{ m}^3$ de volumen está cubierto por el relleno plástico de alta área superficial de $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$, representando un total de superficie de adherencia para crecimiento de biomasa de 100 m^2 en el volumen del reactor.

Como se puede observar los parámetros que tuvieron mayor relevancia en el tratamiento del proceso *batch* realizado en el laboratorio, fueron; la turbidez la cual alcanzó un porcentaje de remoción de 98.6%, la DBO_5 un porcentaje de remoción de 69.8%, la DQO con 68.7% y en la remoción de sólidos, todos ellos tuvieron un promedio de 83.9%, lo que indica que a pesar del proceso realizado en laboratorio fue de seis días de tratamiento tuvo resultados positivos en la remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales, siendo que, con

un proceso continuo como para el que fue diseñado el reactor MBBR tendrá mejores resultados, con un mayor tiempo de tratamiento para el crecimiento de biopelícula la cual hará que la eficiencia en el tratamiento sea mayor.

5.2 Recomendaciones

Para la construcción del tanque y la unión de las piezas de acrílico se recomienda realizar un dibujo tipo dentadura para que encajen en la base y permitir la facilidad de la construcción de este, además de utilizar cloruro de metilo para la unión y fusión de dichas piezas, para impermeabilizar el tanque se utilizará silicona de secado rápido fría la cual es a base de látex acrílico el cual permite la mejor adherencia posible.

Se debe complementar para soportar la presión que crea la gran cantidad de agua y los soportes plásticos, una estructura metálica que encaje perfectamente en los límites del tanque, esto permite que no ceda las paredes del tanque y de este modo se creen aberturas para que el agua a tratar durante el proceso no escape.

En el tema de difusión del aire se recomienda utilizar un *blower* para no sobrepasar la presión que resistan los difusores de aire, además de usar un mayor número de estos para cubrir la mayor cantidad de área en el tanque, y de este modo se permita un mejor proceso para fluidificar el lecho, o se recomienda utilizar un compresor conectado a una manguera con microporos la cual requiere menor gasto de energía.

Se recomienda que se utilice el reactor con el sistema de aireación para posibles diferentes procesos biológicos anaerobios que se puedan realizar.

REFERENCIAS

- Abarca, S., y Mora, B. (2007). Contaminación del agua. Recuperado el 15 de mayo de 2019 de <https://pdfs.semanticscholar.org/7272/8b9d1c6f123736f876dcd94410c8675e26ab.pdf>.
- Agudelo, R. (2005). El agua, recurso estratégico del siglo XXI. Recuperado el 15 de mayo de 2019 de <http://www.redalyc.org/pdf/120/12023109.pdf>
- Alianza por el agua. (2006). Manual de depuración de aguas urbanas. Recuperado el 17 de mayo de 2019 de. <http://alianzaporelagua.org/documentos/MONOGRAFICO3.pdf>
- Arden, E., y Lockett, W. (1914), *Experiments on the oxidation of sewage without the aid of filters*. J. Chem. Technol. Biotechnol., 33: 523-539. doi:10.1002/jctb.5000331005.
- Bahadori, A., y Smith, S. (2016). *Dictionary of Environmental Engineering and Wastewater Treatment (1.ª ed.)*. Berlin, Alemania: Heidelberg: Springer.
- Balarezo, K. (2018). Evaluación del sistema biológico MBBR en la ampliación de la capacidad de tratamiento en PTARI (Tesis Doctoral). Universidad Agraria La Molina. Lima, Perú.
- Ballesteros, M., y Brown, E. (2005). Administración del agua en América Latina: Situación Actual y Perspectivas. Recuperado el 21 de mayo de 2019 de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/6282-administracion-agua-america-latina-situacion-actual-perspectivas>.
- Barros de Macedo, J. (2007). *Agua y Agua (3.ª ed.)*. Belo Horizonte, Brasil: Editorial Varela.

- Bengston, H. (2017). *MBBR Wastewater treatment processes* (1.^a ed.). Calgary, Canadá: SunCam.
- Campos, I. (2003). *Saneamiento Ambiental* (1.^a ed.). San José, Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a Distancia.
- CEAS. (2005). Informe alternativo sobre la salud en América Latina. Recuperado el 16 de abril de 2019 de <https://saludyambiente.uasb.edu.ec/contenido?informe-alternativo-sobre-la-salud-en-america-latina>.
- CEPAL. (2019). Diagnóstico de las estadísticas de agua en Ecuador. Recuperado el 18 de abril de 2019 de <https://aplicaciones.senagua.gob.ec/servicios/descargas/archivos/download/Diagnostico%20de%20las%20Estadisticas%20del%20Agua%20Producto%20Ilc%202012-2.pdf>
- Cohen, Y. (2001). *Biofiltration-the treatment of fluids by microorganisms immobilized into the filter bedding material*. Department of Soil Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences, 77(3), 257-274. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00074-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00074-2)
- CONELEC. (2009). Plan Maestro de electrificación 2009-2020. Recuperado el 25 de mayo de 2019 de <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/10/PME0920CAP1.pdf>
- Cooper, P. (2001). *Historical aspects of wastewater treatment. In Decentralized sanitation and reuse: concepts, systems and Implementation* (3.^a ed.). Londres, Inglaterra: IWA publishing.
- Eighmy, T., y Maratea, D. (2012). *Electron microscopic examination of wastewater biofilm formation and structural components*.

Recuperado el 19 de abril de 2019 de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC242559/>

ETAPA. (2008). Gestión eficiente del agua en Cuenca. Recuperado el 27 de mayo de 2019 de <http://www.munucupalidadcuenca.gob.ec/empresa.php?id=34>

García-Astillero, H. (2018). Tipos de tratamiento de aguas residuales. Recuperado el 27 de mayo de 2019 de https://www.ecologiaverde.com/tipos-de-tratamiento-de-aguas-residuales-1448.html#anchor_1

Gulhane, L., y Kotangale, A. (2012). *Moving Bed Biofilm Reactor – New Innovation in the Field of Conventional Biological Wastewater Treatment*. International Journal of Scientific Research. 2. 167-170. doi: 10.15373/22778179/DEC2013/54.

Guzman, V., y Narváez, G. (2016). Informe técnico recurso agua en el Ecuador. Recuperado el 27 de mayo de 2019 de <http://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/03/Informe-Rendici%C3%B3n-de-Cuentas-ARCA-2017.pdf>.

HannaInstruments. (2018). *Instruction Manual HI 2550 multiparameter pH/ORP/°C EC/TDS/NaCl Bench Meter*. Recuperado el 27 de mayo de 2019 de <http://www.hannainst.com/usa/prods2.cfm?ProdCode=HI20550&id=005001>

HDHS. (2014). *Chapter 2-Wastewater treatment*. Recuperado el 27 de Mayo de 2019 de <http://www.defence.gov.au/jlc/Documents/DSCC/ADFHealthManualVol20,Part8,Chap2>

- Henze, M., van Loosdrecht, G., E., y Brdjanovic, D. (2017). *Tratamiento Biológico de Aguas Residuales: Principios, Modelación y Diseño* (3.ª ed.). Londres, Inglaterra: IWA Publishing.
- IDEAM. (2014). Estudio Nacional de Agua. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado el 26 de mayo de 2019 de http://www.ideam.gov.co/web/sala-de-prensa/noticias/-/asset_publisher/LdWW0ECY1uxz/content/ministerio-de-ambiente-e-ideam-presentan-el-avance-del-estudio-nacional-del-agua-ena-2018-
- INEC. (2016). Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales 2015. Recuperado el 19 de abril de 2019 de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/segun-la-ultima-estadistica-de-informacion-ambiental-cada-ecuatoriano-produce-058-kilogramos-de-residuos-solidos-al-dia/>
- INEC. (2017). Ecuador, Pionero en medición de ODS de Agua, Saneamiento e Higiene. Recuperado el 27 de mayo de 2019 de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/ecuador-pionero-en-medicion-de-ods-de-agua-saneamiento-e-higiene/>
- Kiefer, J. R. (2019). *Wastewater Treatment and Disposal*. Recuperado el 24 de mayo de 2019 de https://www.researchgate.net/publication/229943507_Wastewater_Treatment_and_Disposal
- Kollmann, R., Neugebauer, G., Kretschmer, F., y Truger, B. (2016). *Renewable energy from wastewater - Practical aspects of integrating a wastewater treatment plant into local energy supply concepts*. Journal of Cleaner Production. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.08.168.
- Mohammed, A., y Elbably, M. (2019). *Technologies of Domestic Wastewater Treatment and Reuse: Options of Application in Developing*

Countries. Recuperado el 27 de mayo de 2019 de <https://pdfs.semanticscholar.org/b5c2/68756915661771abd197451db059e35ccfc8.pdf>

Mosey, F. (2006). *Biofilms on Kaldnes carriers particles*. Recuperado el 26 de mayo de 2019 de <https://pdfs.semanticscholar.org/6b61/ef0f8e0a1f77808633bcabe919072d84da67.pdf>

Ødegaard, H. (2000). *Advanced compact wastewater treatment based on coagulation and moving bed biofilm processes*. *Water Science and Technology*. 42. doi: 10.2166/wst.2000.0235..

Ødegaard, H. (1999). *The development of the moving bed biofilm process from idea to commercial product*. Recuperado el 26 de mayo de 2019 de <https://pdfs.semanticscholar.org/6b61/ef0f8e0a1f77808633bcabe919072d84da67.pdf>

Ødegaard, H. (2006). *Innovations in wastewater treatment: –the moving bed biofilm process*. *Water Sci Technol*; 53 (9): 17–33 <https://doi.org/10.2166/wst.2006.284>.

OPS. (1988). *Guías para la calidad del agua potable: Control de la calidad del agua potable en sistemas de abastecimientos para pequeñas comunidades*. Recuperado el 27 de mayo de 2019 de <http://iris.paho.org/xmlui/handle/123456789/712>

OMS. (2006). *Guías para la calidad del agua* (3.ª ed.). Recuperado el 27 de mayo de 2019 de https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_low_sres.pdf

- Polo, J., Torrecillas, A., y Martínez, Á. (2018). Tratamientos biológicos de aguas residuales. Valencia, España: Editorial Universitat Politècnica de Valencia.
- Qasim, S. (1999). *Wastewater treatment plants: Planning, Design and Operation (2.^a ed.)*. Boca Raton, Estados Unidos: CRC Press.
- Ramalho, R. (2003). Tratamiento de aguas residuales. Barcelona, España: Editorial Reverté S.A.
- Rodríguez, J. (2001). Eliminación de la Materia Orgánica y del Nitrógeno en el Agua Residual Urbana Mediante Lechos Inundados.(Tesis Doctoral). Universidad de Granada, España.
- Rusten, B., Eikebrokk, B., Ulgenes, Y., y Lygren, E. (2006) *Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors*. *Aquacultural Engineering*, 34(3), 322-331.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.04.002>
- Sánchez, A. (2014). Aguas Residuales: Realidad y perspectivas. Recuperado el 27 de mayo de 2019 de https://www.sdgfund.org/sites/default/files/EDG_%20ESTUDIO_Ecuador_Estrategia%20Gestion%20Socio%20Cultural%20del%20Agua%20%282%29.pdf.
- SENAGUA. (2011). Políticas para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Recuperado el 26 de mayo de 2019 de <https://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/08/InformeGestion2010-2011.pdf>
- SENAGUA. (2016). Estrategia Nacional de Agua Potable y Saneamiento. Recuperado el 27 de Mayo de 2019, de <https://www.agua.gob.ec/wp->

content/uploads/downloads/2016/REVISTA-
SENAGUA.compressed.pdf

- Sombatsompop, K., Visvanathan, C., y Ben Aim, R. (2006). *Evaluation of biofouling phenomenon in suspended and attached growth membrane bioreactor systems*. *Desalination*, 201(1–3), 138-149. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.02.011>.
- Surti, H. (2016). *Pshyco-chemical and microbial Analysis of Wastewater from different industry and COD reduction Treatment of Industrial Wastewater by using Selective Microorganisms*. *Int. J. Curr. Microbiol.App.Sci*, 5(6), 707-717. <http://dx.doi.org/10.20546/ijcmas.2016.506.077>
- Takasaki, M., Kim, H., Sato, A., Okada, M., y Sudo; R. (1990). *The Submerged Biofilm Process as a Pre-Treatment for Polluted Raw Water for Tap Water Supply*. *Water Sci Technol*. 22(1-2), 137–148. <https://doi.org/10.2166/wst.1990.0143>
- Tchobanoglous, G., Burton, F., y Stensel, H. (1980). *Wastewater engineering: An Overview. Wastewater Engineering Treatment And Reuse*. *Advance in Water Resources*, 3(3), 146. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(80\)90067-6](https://doi.org/10.1016/0309-1708(80)90067-6)
- Téllez, S. (2010). *Los Biofilms y su repercusión en la Industria Alimentaria*. Madrid, España: Revista VISAVET.
- Todar, K. (2007). *Microbial metabolism (electronic version)*. Recuperado el 28 de mayo de 2019 de <http://www.bact.wisc.edu/thermicrobialworld/metabolism.html>
- Torres, P., Hernán, C., y Patiño, J. (2009). *Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para*

consumo humano. Una revisión crítica. Medellín, Colombia: Revista Ingenierías.

UNESCO. (2003). Agua para todos, agua para la vida. Recuperado el 27 de Mayo de 2019, de <http://www.un.org/esa/sustdev/sdissues/water/WWDR-spanish-129556s.pdf>

Wolff, D., Ochoa, J., Paul, E., y Costa, R. (2005). *Nitrification in hybrid reactor with a recycled plastic support material*. Braz arch biol technol. 48. (10). doi:1590/S1516-89132005000400030.

WHO. (2013). *Water Quality and Health Strategy*. Recuperado el 27 de Mayo de 2019 de http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2013/water_quality_strategy/en/

Zalakain, G., y Manterola, G. (2011). Procesos avanzados de biomasa sobre lecho móvil para el tratamiento de aguas residuales en la industria farmaceutica. Recuperado el 22 de mayo de 2019 de http://www.veoliawatertechnologies.es/vwst-iberica/ressources/documents/1/6295,Marzo_Abril-2011.pdf

ANEXOS

Anexo 1. Corte láser de acrílico para piezas del tanque.



Anexo 2. Construcción del tanque con cloruro de metilo, silicona y tornillos.



Anexo 3. Construcción de estructura metálica, tubo metálico cuadrado galvanizado.

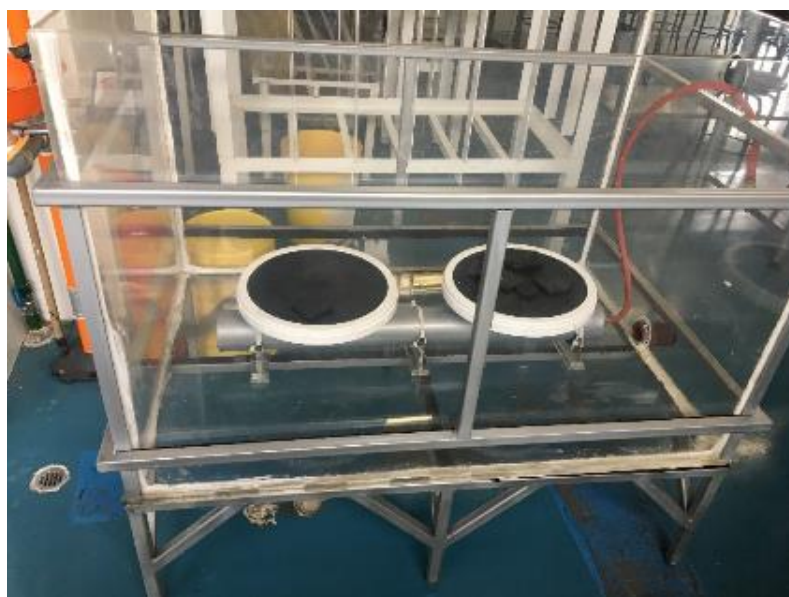


Anexo 4. Construcción estructura metálica, soldadura, pernos y pintura.

Anexo 5. Prueba de difusores de aire, con soporte de tubo galvanizado de 3 pulgadas y pruebas de retención de agua dentro del tanque.



Anexo 6. Tanque reactor ubicado en el laboratorio de Ingeniería Ambiental ubicado en el campus Queri, UDLA.



Anexo 7. Bolsa de soporte plástico (MBBR filter media) 0.1 m³



Anexo 8. Tanque reactor realizando pruebas hidráulicas, agua y soporte



plástico.

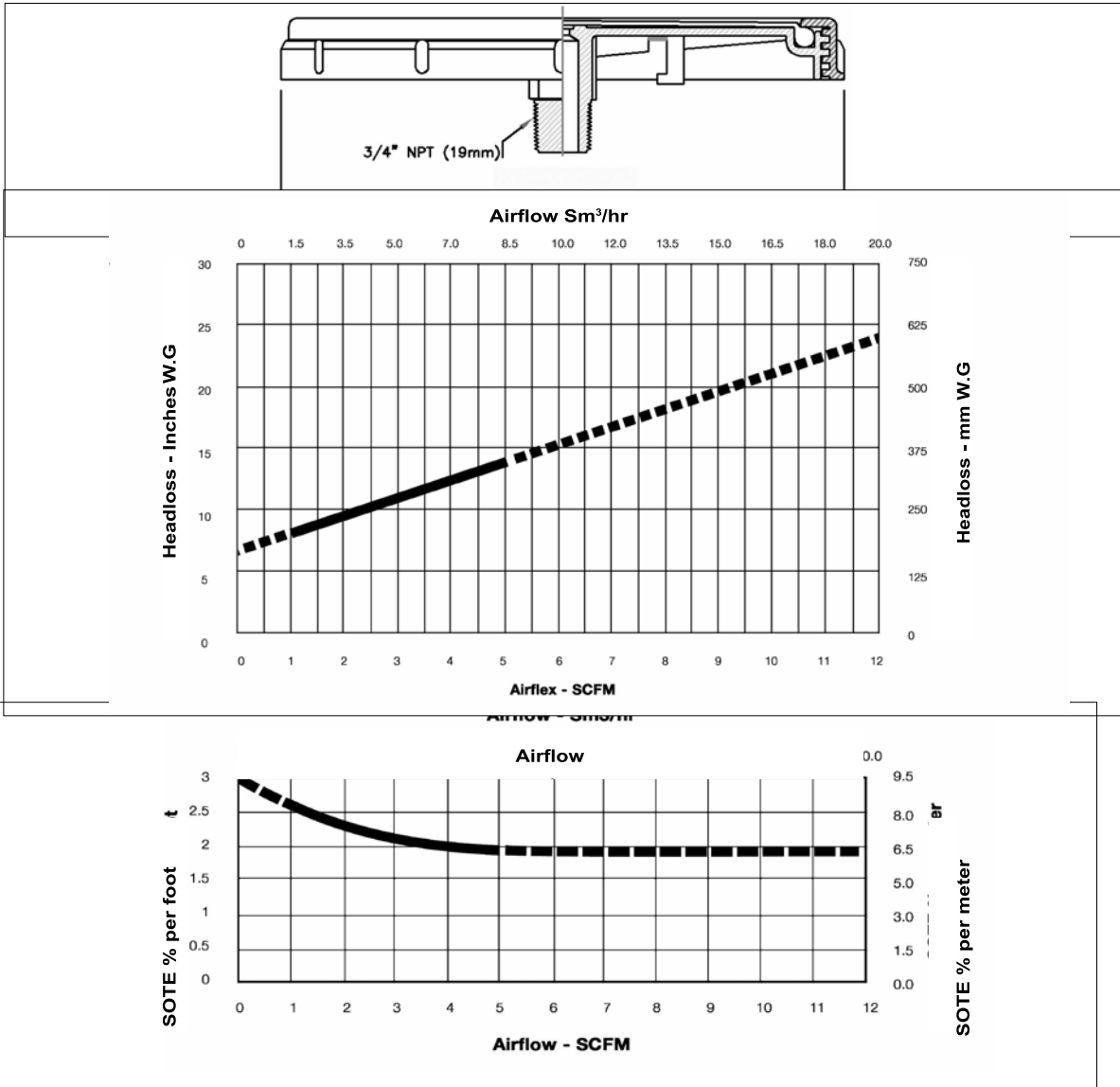
Anexo 9. Ficha técnica Difusores de burbuja fina 12 pulgadas SSI Aireation

SSI™ FINE BUBBLE DIFFUSERS

AFD350 12" DISC

continued

T E C H N I C A L D A T A S H E E T



DESIGN FLOW	FLOW RANGE	ACTIVE SURFACE AREA	SLIT QUANTITY	WEIGHT
2.5 - 5.0 SCFM (4.2 - 8.3 Sm ³ /hr)	0 - 12 SCFM (0 - 20 Sm ³ /hr)	0.700 ft ² (0.065 m ²)	10,155	3.0 lbs (1.4 Kg)

Anexo 10. Datos técnicos de los soportes plásticos usados, en este ensayo es el LY005. Una variante del PE05.



Model	LY001	LY002	LY003	LY004	LY005
Spec(mm)	12*9	11*7	10*7	16*10	25*12
Hole number (pcs)	4	4	5	4	19
Efficient surface(m ² /m ³)	>800	>900	>1000	>800	>500
Density(g/m ³)	0.96-0.98	0.96-0.98	0.96-0.98	0.96-0.98	0.96-0.98
Packing numbers (pcs/m ³)	630000	830000	850000	260000	97000
Porosity (%)	85	85	85	85	90
Dosing rate (%)	15-67	15-68	15-70	15-67	15-65
Membrane-forming time(Days)	3-15	3-15	3-15	3-15	3-15
Nerficafon efcieny(gNH ₄ -N/w3. d)	400-1200	400-1200	400-1200	400-1200	400-1200
BODs oxidaion efcieny(gBOD ₅ /m ³ .d)	2000-10000	2000-10000	2000-10000	2000-10000	2000-10000
COD oxidaticon efcieny(gCOD/m ³ .d)	2000-15000	2000-15000	2000-15000	2000-15000	2000-15000
Applicable temperabure(°C)	5-60	5-60	5-60	5-60	5-60
Life-span (years)	15	15	15	15	15

