



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**Desarrollo, modelado y prototipado asistido por AutoCAD e impresión 3D para la construcción de módulos tubulares de aireación e internos de reacción para un reactor biológico tubular que trata agua residual urbana.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**P R E S E N T A:**

**CÉSAR IVÁN GONZÁLEZ HERNÁNDEZ**



**ASESOR DE TESIS: Dr. SEGIO ADRIÁN GARCÍA  
GONZÁLEZ**

**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



## **Jurado asignado**

Presidente:	Dr. Luna Pabello Víctor Manuel
Secretario:	Dra. Lazcano Arriola Luz María
Vocal:	Dr. García González Sergio Adrián
1er suplente:	I.Q Manríquez Tolsá Úrsula
2do suplente:	Dr. Durán Moreno Alfonso

### **Sitio donde se desarrolló el tema:**

Unidad de proyectos y de investigación en ingeniería ambiental (UPIIA)

Laboratorios 301 a 303, Conjunto “E”, Facultad de Química UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán, CDMX

Asesor del tema: \_\_\_\_\_

Dr. Sergio Adrián García González

Supervisor Técnico: \_\_\_\_\_

Dr. Alfonso Durán Moreno

Sustentante: \_\_\_\_\_

César Iván González Hernández





## **Agradecimientos**

Quiero agradecer primeramente a Dios por permitirme llegar a este momento y el poder estar con las personas que me acompañan.

A mi abuela Mercedes por todo su apoyo incondicional en todos los aspectos de mi vida, mi mayor ejemplo de perseverancia y trabajo.

A mi abuelo Julio por estar siempre como el jefe de familia y tener su apoyo.

A Laura por apoyarme y motivarme a concluir este proceso en mi formación y en mi vida.

A mi papá y a Eli por creer siempre en mí y en mis decisiones.

A mis tíos, Humberto, Manuel, José y a mis tías Rosa y Nazaria por siempre apoyarme en lo que pudieran.

A mis hermanos Julio, Omar y a mis hermanas Brenda y Mariel por acompañarme en mi vida.

A mi tío Lupe por sus consejos en diversos temas prácticos y su ayuda.

Al Dr. Alfonso Durán por sus recomendaciones y observaciones y al Dr. Sergio García por sus consejos y apoyo. A los integrantes del laboratorio 301 por su compañía.





#### Agradecimientos

A mis sinodales el Dr. Luna Pabello y la Dra. Lazcano Arriola por sus correcciones y sugerencias que le dieron a este documento la solidez necesaria.

Trabajo realizado gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de investigación e innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM (IT102118) “Diseño de un prototipo comercial de una planta paquete de tipo tubular para el tratamiento de aguas residuales con fines de reúso”

Igualmente, gracias al proyecto 9125c19 (SECTEI/259/2019). Entre la facultad de química y la SECTEI. “Tratamiento y reúso in situ de aguas residuales en espacios públicos culturales, educativos, deportivos y de servicios de la CDMX mediante procesos biológicos y fisicoquímicos, en módulos tubulares compactos y de bajo costo”





## Índice de capítulos

Resumen .....	9
Introducción .....	11
Justificación .....	13
Objetivo .....	14
Marco Teórico .....	15
Tratamientos de agua residual.....	20
Breve historia de los tratamientos de agua residual .....	20
Centralización .....	25
Descentralización .....	28
Pequeñas plantas de tratamiento de agua. ....	33
Desarrollo de un nuevo producto .....	35
Diseño de Tecnologías Compactas, caso RBT. ....	36
Prototipado e impresión 3D .....	42
Metodología.....	46
Desarrollo .....	50
Etapa I: Diseño de las piezas internas del RBT .....	50
Diseño de modelos 3D en AutoCAD para soporte del difusor del aire .....	50
Diseño de modelos 3D en AutoCAD para el interno polimérico de fibra no tejida .....	53
Etapa II: Construcción del prototipo de interno del RBT .....	62
Impresión 3D de modelos y pruebas de montaje.....	62
Acomodo interno del material polimérico de soporte para la biopelícula. ....	64
Unión del material polimérico no tejido. ....	65
Armado y pegado del prototipo A .....	67
Armado y pegado del prototipo B .....	69
Etapa III: construcción de la estructura del Reactor Biológico Tubular y pruebas de montaje de los módulos de aireación y de reacción.....	71
Ensamblado de la estructura del reactor biológico tubular. ....	71
Resultados, análisis y discusión.....	72





	Índice de capítulos
Etapa I.....	72
Etapa II.....	78
Etapa III.....	85
Conclusiones.....	90
Bibliografía .....	91
Anexo B: Proceso de armado del prototipo A.....	95
Anexo C: Proceso de armado del prototipo B. ....	97





## Índice de figuras

Fig. 1: Esquema simplificado de gestión de agua centralizada. Elaboración propia.	26
Fig. 2: Esquema simplificado del ciclo de agua en un sistema descentralizado. Elaboración propia.	31
Fig. 3: Diagrama de flujo de proceso del caso RBT previo.	38
Fig. 4: Fuentes Cuevas A. A. "Estructura de fibra no tejida dentro del reactor tubular de biopelícula", 2017, tesis de licenciatura, p. 60	39
Fig. 5: Esquema de elaboración de un diseño 3D. Elaboración propia.	47
Fig. 6: Diagrama de flujo de la metodología de mejora continua aplicada en este trabajo.	49
Fig. 7: Bosquejos de los diseños a partir de las necesidades del proyecto para el difusor.	51
Fig. 8: Diseños en 2D de las piezas de soporte del difusor realizadas en AutoCAD. Elaboración propia.	52
Fig. 9: Diseños en 3D de las piezas de soporte del difusor realizados en AutoCAD. Elaboración propia.	53
Fig. 10: Diseño en 2D para soporte de la fibra polimérica realizado en AutoCAD. Elaboración propia.	54
Fig. 11: Piezas que conforman el soporte de la fibra polimérica realizados en AutoCAD. Elaboración propia.	55
Fig. 12: Zonas del prototipo vistas desde un corte transversal. Elaboración propia.	56
Fig. 13: Distribución esperada de las piezas en el RBT, modelo 3D realizado en AutoCAD. Elaboración propia.	57
Fig. 14: Detalle de las piezas diseñadas para el soporte de la fibra polimérica. Modelo 3D realizado en AutoCAD. Elaboración propia.	57
Fig. 15: Comparación de los detalles de las piezas diseñadas para el prototipo. A la izquierda el modelo A. A la derecha el modelo B. Elaboración propia.	59
Fig. 16: Diseño 2D de las tapas que irán al inicio y final de los internos del RBT. Diseñado en AutoCAD. Elaboración propia.	60
Fig. 17: Diseño 3D de las tapas de los internos del RBT. Elaboración propia.	60
Fig. 18: Modelo del reactor biológico tubular elaborado en AutoCAD. Elaboración propia.	62
Fig. 19: A la izquierda: Soporte anterior del difusor de aire. Al centro: Difusor con ambas piezas impresas en 3D. A la derecha: Soporte posterior del difusor de aire.	63
Fig. 20: Acomodo preliminar de la fibra polimérica usando los diseños realizados para los soportes.	65





Índice de tablas

Fig. 21: Pegado de la fibra polimérica. A: pegado con Resistol 5000. B: Pegado con pegamento para PVC marca Siler. C: Pegado con pegamento dorado para PVC marca Omega Pitbull.....	66
Fig. 22: Modelo "A" del prototipo de interno terminado. ....	68
Fig. 23: Modelo "A" con una capa de fibra polimérica añadida al final. ....	69
Fig. 24: Modelo "B" del prototipo de interno terminado. ....	70
Fig. 25: Estructura principal del Reactor Biológico Tubular RBT.....	71
Fig. 26: a: Configuración de la fibra desarrollada en esta tesis. b: Porosidad de la fibra polimérica y desarrollo de la biopelícula. c: Micro conductos de agua en la biopelícula. Elaboración propia. ....	81
Fig. 27: relación entre materia orgánica removida, producción de masa celular y velocidad de consumo de oxígeno (Water Environment Federation, 2011). ....	82
Fig. 28: relación entre materia orgánica consumida y crecimiento celular (Water Environment Federation, 2011).....	83
Fig. 29: Prototipo del módulo de aireación al interior del Reactor Biológico Tubular. ....	86
Fig. 30: Prototipo "A" al interior del Reactor Biológico Tubular.....	86
Fig. 31: Prueba de montaje del prototipo construido con las piezas del modelo "B". ....	87
Fig. 32: Esquema representativo del reactor biológico tubular y el cambio de su fibra interna. ....	88
Fig. 33 Diagrama de flujo de proceso propuesto para el proceso según los internos desarrollados.....	89

**Índice de tablas**

Tabla 1: Comparación de diferentes tipos de tecnologías en volumen y eficiencia de remoción (Pérez, 1997) y (Durán y García, 2017).....	19
Tabla 2: Balance de materia del modelo previo del reactor biológico tubular (López, 2020). ....	75





## Resumen

En el presente trabajo se desarrolló, modeló y construyó un prototipo interno de módulos de aireación y reacción del reactor biológico tubular, los modelos fueron generados digitalmente en 3D con el programa AutoCAD, el trabajo realizado está basado en lo expuesto previamente en la solicitud de patente MX/a/2017/014623.

Se desarrollaron diseños desde la idea conceptual, pasando por su dibujo digital en 2D, su elaboración en diseño tridimensional hasta su materialización a través de la impresión 3D. Se muestra la metodología de construcción, las consideraciones hasta la presentación y pruebas de montaje del prototipo.

En el transcurso del proyecto se realizaron modificaciones de diseño y dimensiones para el perfeccionamiento del prototipo, mediante la metodología de mejora continua, se fueron afinando los detalles haciendo que el prototipo fuera adquiriendo mejores características de diseño y que tuviera las dimensiones adecuadas, con lo cual se llegó al prototipo final que cumple con los requerimientos necesarios para incorporarse al reactor y posteriormente realizar pruebas de funcionamiento.

El prototipo que se realizó demostró cumplir con su función de diseño, permitiendo la correcta distribución del soporte polimérico para fijación de biopelícula además de permitir el flujo del agua requerido, esto con base a conocimientos previos del espaciado de la fibra en operación y las características de flujo.

A la par del diseño de los internos del reactor biológico tubular se llevó a cabo la construcción de la estructura principal, esta construcción se apoyó de un modelo 3D realizado en este trabajo y con base en esta estructura, se muestra





Resumen esquemáticamente el proceso de tratamiento que se realizará mostrando la ubicación del prototipo desarrollado en esta tesis y su relación con la ingeniería química, ya que en el reactor se presenta transformación de materia a través de procesos bioquímicos que son llevados a cabo en la biopelícula formada, los procesos pueden ser simplificados en un balance de materia, además cabe destacar la importancia de la transferencia de masa en el caso del oxígeno disuelto que es necesario en este proceso aerobio y que se tomó en cuenta para el desarrollo del prototipo de reacción.

Este proyecto es importante ya que permitió tener una muestra física del soporte biológico así también del soporte del difusor de burbuja fina a partir de trabajos previos, desde un reactor escala laboratorio hasta una planta piloto. Los componentes desarrollados son significativos para dar el siguiente nivel a la tecnología RBT dentro de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, para ser probada en un sitio de oportunidad.





## Introducción

En México, el saneamiento, agua potable y alcantarillado son responsabilidad de los gobiernos municipales, el último reporte indica que la cobertura del drenaje en el país es del 73%, con 2,477 plantas de tratamiento. Sin embargo, solo 57% de las aguas municipales recolectadas en el sistema de drenaje son tratadas, y existe un volumen indeterminado de aguas que no son colectadas debido a que se pierden en las redes de desagüe o son vertidas ilegalmente al medio ambiente (Ceja de la Cruz, 2019).

Estas descargas no reguladas generan diversos problemas en los cuerpos de agua, desde ambientales hasta sociales, en zonas tanto rurales como urbanas, que no están centralizadas a una planta de tratamiento municipal, bajo este panorama se desarrolló este tema que involucra a un sistema de tratamiento compacto y económico, el Reactor biológico tubular (solicitud de patente MX/a/2017/014623).

Los tratamientos de aguas residuales evolucionan con la aplicación de tecnologías conocidas y tecnologías nuevas, desarrolladas para mejorar la calidad del agua, incrementar la cantidad a tratar o resolver problemas en el tratamiento, ya sea energéticos, operacionales o de generación de lodos, estos desarrollos se llevan a través de procesos físicos, químicos y biológicos que juegan un papel importante en el tratamiento, solos o en combinación con otros métodos.

Estos desarrollos han llevado al reactor biológico tubular antes mencionado, cuya tecnología permite el reúso de aguas residuales a pequeña escala utilizando la fijación de microorganismos en una biopelícula dentro de un material polimérico





(García González, 2019), una biopelícula consiste en células inmovilizadas o adheridas sobre un medio soporte, embebidas en una matriz de polímeros orgánicos de origen microbiano y con una fracción significativa de sustancias abióticas o inorgánicas (Molina Burgos, 2015), esto aumenta el área superficial disponible y por lo tanto reduce el tamaño del reactor en comparación a técnicas tradicionales.

En el contenido del presente trabajo se desarrolla y expone lo realizado en el proyecto sobre la implementación de internos de aireación y reacción en los módulos tubulares para sistemas de tratamiento de agua residual urbana en cuanto a desarrollo, modelado computacional y construcción.

Se muestran los desarrollos generados a través de modelos en 3D realizados en el programa AutoCAD de los internos y su progreso desde idea conceptual. Así mismo se presenta lo referente a la construcción de prototipos de módulos tubulares pertenecientes a la tecnología.

Se encuentran los modelos en 3D, su impresión y las pruebas de montaje realizadas que permitieron valorar los módulos internos de la tecnología y probar los soportes más adecuados para construir y mejorar el prototipo.

En cuanto a la construcción del reactor biológico tubular, se puede encontrar cómo se espera que el desarrollo y construcción del prototipo se integre en el proceso y además mejore el proceso previo del RBT.





## Justificación

Se puede decir que, debido a aspectos multifactoriales, existen grandes disparidades geográficas en el tratamiento de aguas en el país. De acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2014), en los estados de Nuevo León y Aguascalientes se trata más de 90% del caudal generado, mientras que en Yucatán, Campeche e Hidalgo se trata menos de 10% y esta tendencia se mantiene hasta la fecha y eso se puede extrapolar a nivel región, continente y en el mundo. La cualidad del reactor biológico tubular en cuanto a tamaño, ya que es compacto, podría ayudar a mitigar esta disparidad apoyándose de la ayuda de los gobiernos locales y empresas particulares que radiquen en esas regiones para aprovechar la tecnología en zonas focalizadas, y con otras tecnologías para lograr una sinergia que ayude a remediar los problemas medioambientales.

De lo anterior se debe considerar que para que la tecnología pueda instalarse y empiece a tener un impacto ambiental positivo, por ejemplo, llevando agua a calidad de reúso con los estándares de la NOM-003-SEMARNAT-1997 y no se descargue sin tratamiento alguno, es necesario mejorar los diseños internos de los módulos del reactor biológico tubular y para ello la construcción de prototipos es de gran relevancia y son necesarios antes de una producción a gran escala.





## Objetivo

### Objetivo General

- Diseñar un módulo de aireación-reacción en la tecnología RBT, mediante un balance de masa y criterios de diseño establecidos para conceptualizar modelos en tercera dimensión en AutoCAD 3D y así aplicarlos en la construcción de un prototipo de un módulo tubular que tratará aguas residuales urbanas.

### Objetivos particulares

- Establecer un balance de masa en el módulo tubular con datos previos de la tecnología para la estimación de diseño de un prototipo interno de reacción.
- Diseño 3D de las piezas internas utilizando AutoCAD para conformar los módulos de aireación y reacción.
- Pruebas de ensamblaje de las piezas diseñadas con impresión 3D para mejorar su diseño.
- Diseño y construcción de la estructura principal del reactor biológico tubular.
- Prueba de montaje y desmontaje del prototipo usando la estructura del RBT para verificar medidas y conformación del soporte biológico.





## Marco Teórico

En el tratamiento de aguas residuales los procesos se clasifican dependiendo de su principio de acción por ejemplo en procesos físicos, químicos, biológicos y la combinación de estos. De igual manera se pueden clasificar dependiendo de las características de las etapas de tratamiento en primarias, secundarias y terciarias. Los tratamientos primarios son aquellos procesos físicos donde se eliminan comúnmente algunos sólidos de fácil remoción, los secundarios donde se utilizan comúnmente procesos biológicos para mejorar la calidad del agua reduciendo su carga orgánica y terciarios donde se da un tratamiento final dependiendo de la calidad de agua esperada en el efluente ya que puede ser reusada en diferentes tareas o dispuesta en un cuerpo de agua.

Algo importante para este trabajo es el panorama del tratamiento y reúso de agua, estos dos ámbitos que deberían de ser claves en la cultura del hombre son desplazados por otros asuntos no necesariamente más importantes, el tratamiento de aguas residuales en México por ejemplo se realiza principalmente por los municipios en plantas de tratamiento de gran capacidad conectadas a la red de alcantarillado municipal, como más adelante se expondrá este sistema de tratamiento necesita de un complemento para poder satisfacer las necesidades en cuanto a tratamiento.

En cuanto al reúso se ve disminuido por lo anteriormente mencionado, las aguas residuales son recogidas y canalizadas a una planta de tratamiento central lo que ocasiona que esta agua que recibió tratamiento no pueda ser reusada en su sitio de generación. El tratamiento y reúso de agua deberían cumplir un ciclo cerrado donde





Marco Teórico

se pueda aprovechar el agua y así evitar excesos, cabe mencionar que el reúso del agua puede darse sin la necesidad de un tratamiento por ejemplo el uso del agua de limpieza para sanitarios, esto depende ya totalmente de la cultura de las personas.

Para disminuir los problemas de tratamiento y reúso las plantas descentralizadas son una opción por ello se requiere el desarrollo de pequeñas plantas de tratamiento de agua y la tecnología que conlleva, es por ello que éstas han tenido un incremento en los últimos años al rededor del mundo (Massoud et al., 2009), la tecnología de estas plantas es muy variada y depende de las características del agua a tratar y del fin que se le planea dar además de otros factores.

Elegir la mejor tecnología para una planta de tratamiento de agua implica considerar cuatro cosas relacionadas entre sí, las alternativas tecnológicas, las cuestiones económicas, los aspectos sociales, y el alcance ambiental (Molinos Senante et al., 2015). A partir de esto, esta tecnología debe ser implementada y sus resultados analizados para que sea considerada plenamente en un futuro, debido a que se necesitan tecnologías compactas para tratamiento de agua residual en el mundo.

El modelo previo de la tecnología del reactor biológico tubular ha demostrado ser compacto y funcional, pero requería de un diseño más en forma para un escalamiento mayor y que pueda ser instalado en diferentes lugares según convenga y se dé la oportunidad. Para el desarrollo de un modelo interno viable de un producto final es necesario desarrollarlo y probarlo previamente con un equipo construido, validando así sus características u otros aspectos, o sea un prototipo. Hacer un prototipo consiste en materializar una idea que antes sólo era aparente en





Marco Teórico

la mente de los desarrolladores. Cada técnica que se traduce en una idea a un formato tangible puede considerarse como un método de creación de prototipos. En este contexto, un boceto simple puede verse como un método de creación de prototipos, así como un prototipo completamente funcional (Detand et al., 2010) en esta tesis se espera obtener un prototipo con las características deseadas a partir de desarrollos y ensayos previos del reactor biológico tubular.

La necesidad de implementar sistemas de tratamiento de agua es más evidente en países en desarrollo. Según la UNESCO, a nivel mundial sólo 56% de la población vive en regiones donde se utilizan instalaciones mejoradas a las convencionales. El sistema de tratamiento de agua residual descentralizado más común en el mundo son los tanques sépticos que inyectan el agua residual en el suelo, los costos de este método son bajos al no requerir mucho mantenimiento sin embargo este tratamiento no es efectivo al remover nitrógeno, fosforo o microorganismos patógenos (Moussavi et al., 2010), por ello es necesario mejorar la tecnología instalada.

La situación en México como en muchas otras naciones incluso países llamados de primer mundo, es de oportunidad, debido a que en México existen problemas en cuanto a las descargas de agua domésticas sin ningún tratamiento, otro dato es el de la comisión nacional del agua que en el año 2016 reportó que más del 40% de las aguas que fueron colectadas por un sistema de drenaje no recibieron ningún tipo de tratamiento antes de ser vertidas en algún cuerpo de agua final (IDOM Consulting Engineering Architecture, 2018).





Marco Teórico

En México como a nivel mundial existen lugares donde se emplean tanques sépticos además de lugares donde el agua residual se descarga directamente a los cuerpos de agua. Adicionalmente, México se encuentra en situación de sobreexplotación de algunos mantos acuíferos, ya que no se les da oportunidad de recargarse, esto en parte es porque las aguas superficiales han sido contaminadas por descargas que ha llevado a una situación donde todo el cuerpo de agua ya no se puede aprovechar. Se deberá tener especial cuidado con el agua subterránea, ya que su sobreexplotación ocasiona el abatimiento de los niveles freáticos, el hundimiento del terreno y que se perforen pozos a mayor profundidad.

Con relación a lo anterior, saber que parte de la población rural, especialmente en zonas áridas, depende de manera significativa del agua subterránea, agrava el problema. Con el fin de hacer frente a la disminución de la disponibilidad del agua en los próximos años, será necesario realizar acciones para reducir su demanda, el agua tratada y el reúso de esta es una opción viable para combatir estos problemas a futuro. Se espera una proyección donde el agua renovable per cápita alcanzará niveles cercanos o incluso inferiores a los 1 000 m<sup>3</sup>/hab/año, lo que se califica como una condición de escasez (CONAGUA, 2011).

En cuanto a la situación global de acuerdo con un reporte de la asociación internacional del agua (IWA por sus siglas en inglés) aproximadamente 80% de las aguas residuales son descargadas directamente en las cercanías de ríos o lagos sin recibir ningún tipo de tratamiento (IWA, 2018).

Estas descargas contienen una alta DBO (demanda bioquímica de oxígeno) que es un parámetro de la calidad del agua que indica la cantidad de oxígeno que requieren





Marco Teórico

los agentes biológicos para degradar la materia orgánica, ligado al parámetro de DBO, la cantidad de nutrientes en el agua, nitratos y fosfatos, ocasionan problemas de eutrofización lo que significa un crecimiento de plantas acuáticas y algas que deterioran las propiedades del agua. Un proceso biológico como el que ha demostrado llevar el reactor biológico tubular es la solución para la reducción de nutrientes en el agua causantes de la eutrofización.

Los reactores de biopelícula reducen la generación de lodos y son más compactos, en comparación con tecnologías tradicionales como lodos activados por ejemplo en la tabla 1 se aprecian datos de volumen, tiempos de retención y eficiencias de remoción, esto les permite disminuir algunos de los problemas que sufren las plantas de tratamiento de agua para su instalación. Por ello su desarrollo es una oportunidad para remediar problemas ambientales y evitar que sigan creciendo.

*Tabla 1: Comparación de diferentes tipos de tecnologías en volumen y eficiencia de remoción (Pérez, 1997) y (Durán y García, 2017).*

Proceso	Tipo	Volumen del reactor (m <sup>3</sup> )	Tiempo de retención (h)	Eficiencia de remoción (%)
Lodos activados	Aeróbico	10	4-6	90-95
Discos biológicos	Aeróbico	1	1-3	90-95
Flujo ascendente	Anaeróbico	2	24	50-60
Filtración anaeróbica	Anaeróbico	2	36	40-50
Tanque séptico	Anaeróbico	2	36	25
Cultivo hidropónico	Anaeróbico y aeróbico	6	12	65-75
Reactor biológico tubular (piloto)	Aeróbico	0.25	0.92	50-98.43

Otros ámbitos que juegan un papel importante en la instalación de un proceso de tratamiento son los aspectos económicos, sociales y políticos, por ejemplo, se puede destacar que el costo del RBT es relativamente bajo comparado con costos





Marco Teórico de instalación de red y mantenimiento de un sistema centralizado en lugares de difícil acceso o lejanos a la red de canalización. En cuanto al aspecto social también existen ventajas debido a que al ser compacto no genera molestias a la población en comparación de si se intentara instalar toda una PTARM. Políticamente podrían hacerse convenios con instituciones gubernamentales e instalarse reactores biológicos en lugares de oportunidad. Como se ve la innovación y desarrollo de nuevas tecnologías permiten conseguir alguna mejora ya sea económica, practica, social o medio ambiental y son de gran interés en la actualidad, pero esto no siempre ha sido así.

## **Tratamientos de agua residual.**

### **Breve historia de los tratamientos de agua residual**

La historia del hombre en torno al tratamiento o gestión de agua se remonta a los tiempos antiguos, a la ciudad de Roma, alrededor del año 800 A.C. los romanos construyeron la Cloaca Máxima, el sistema central de alcantarillado para drenar un pantano sobre el cual se edificó Roma tiempo después, el sistema conducía el agua superficial hacia el río Tíber. Cerca de 900 años después el sistema había mejorado y se conectaba a algunas casas, el sistema de alcantarillado en las calles permitía la existencia de letrinas públicas y además que los romanos pudieran salir a tirar sus aguas residuales a las calles y todo fuera conducido al río Tíber (Wolfe, 1999). Se ve que la necesidad de disponer de agua residual lejos de la ciudad era lo único que importaba en ese momento, pero no dejaba de ser un gran avance para la época.





Marco Teórico

El sistema que habían desarrollado los romanos vería su fin junto con ellos, posteriormente a la caída del imperio en el año 476 DC, las grandes ciudades de Europa del momento, simplemente tiraban todos sus residuos a las calles, la lluvia, el tránsito de personas y animales era lo único que dispersaban estos residuos de las calles, en el siglo XIII el rey Felipe II de Francia ordenó la pavimentación de las calles lo que provocó que la basura y las aguas residuales no pudieran descomponerse en la tierra por lo que en 1348 el rey Felipe VI formó el cuerpo de limpieza para las calles, años después se construirían algunas alcantarillas que llevaban el agua residual al río Sena. En el siglo XVI debido a las plagas que barrieron Europa el rey Francisco I de Francia ordenó la construcción de pozos en las casas para que se colectaran las aguas residuales generadas, estos pozos en otras ciudades como por ejemplo Londres existían desde el siglo XII (Wolfe, 1999) se nota con lo anterior que desde la caída del imperio Romano y hasta el periodo de la edad media los desarrollos en tecnología para gestión o tratamiento de agua fueron casi nulos lo que traería posteriormente muchos problemas de salubridad.

Las enfermedades que se extendían rápidamente fueron la causa principal de que los reinados en Europa buscaran la manera de gestionar mejor el agua residual debido a que las hipótesis científicas de ese tiempo creían que las enfermedades se transmitían por el miasma, el hedor proveniente del agua estancada (Melosi 2000).

No fue hasta que la humanidad tuvo un desarrollo significativo en diversas áreas, en un siglo conocido como de las luces cuando de la mano de la revolución industrial cuando, por ejemplo, Londres inició la adopción del sistema del uso de inodoros





Marco Teórico

conectados al sistema de alcantarillado en las casas sin embargo estas aguas residuales domesticas eran conducidas directamente al río Támesis, y en esta época, mediados del siglo XIX, la idea errónea con respecto a la contaminación fue aplicada, tomando en cuenta que la solución a la contaminación es la dilución pero los deshechos llegaron a ser considerables y estos no se dispersaban por ello algo se tenía que hacer para remover estos contaminantes. Una consecuencia de esto surgió en el mismo siglo donde un médico inglés, John Snow probó que la cólera era transmitida por heces fecales que llegaban al agua y posteriormente esta agua era suministrada a las casas como agua potable (Zeeman, 2001).

Las epidemias surgidas en Europa y con el nuevo conocimiento adquirido motivaron la construcción o mejoramiento de los sistemas de alcantarillado y además el tratamiento de los desechos generados, por ejemplo para darle un uso, el inglés James Smith creo un sistema de distribución para poder utilizar el agua residual como fertilizante de sus campos de algodón este sistema continuo funcionando con algunas modificaciones pero fue gradualmente abandonado debido a las cantidades de terreno que deben de estar cerca de las ciudades, otro parámetro fue que difícilmente esto cumplía con los altos estándares de higiene que fueron surgiendo posteriormente.

A partir de 1850 aproximadamente y hasta inicios del nuevo siglo surgieron varios cientos de patentes para tratamiento de agua residual estas buscaban dos cosas la eliminación de los contaminantes y la producción de abono que era muy solicitado en esa época debido a las colonias de cultivo en américa. Para la remoción de contaminantes los tratamientos químicos fueron de gran ayuda, pero tenían





Marco Teórico

desventajas, estos solo removían los contaminantes suspendidos y esto solo significaba una fracción de los contaminantes presentes además de que los contaminantes eliminados solo pasaban a estar aglutinados por lo que era aún necesario disponer de alguna forma de ellos. Cuando los tratamientos biológicos llegaron a finales del siglo XIX los tratamientos químicos quedaron gradualmente en desuso sin embargo en las últimas décadas se han vuelto a usar tratamientos químicos para eliminar fosfatos y otros contaminantes (Zeeman, 2001).

Como se mencionó los tratamientos para agua residuales empezaron a tener gran auge, los sedimentadores primarios aparecieron a mediados del siglo XIX y fueron presentándose mejoras con el paso de los años y hasta la actualidad se siguen aprovechando, una de los cambios que se dieron, llevaron a la patente de los tanques sépticos en 1895 posteriormente otro tipo de tanque fue desarrollado este fue el tanque de Imhoff que consiste en dos cámaras que separan los sólidos sedimentados y los lodos del proceso de digestión estos tanque tuvieron un gran éxito y hoy en día aún se siguen usando mundialmente (G. Zeeman, 2001).

A raíz de los tratamientos en cámaras que eran llevado por los microorganismos presentes se inició un desarrollo que avanzaría hasta la fecha. Este tipo de tratamientos dependientes de microorganismos fueron llamados tratamientos biológicos y los se pueden definir como la reducción de materia orgánica presente en el agua residual a través del uso de microorganismos, esta reducción se lleva a cabo por medio de oxidación biológica, por reacciones bioquímicas dadas por el propio metabolismo de los microorganismos, entre los cuales se encuentran bacterias, hongos, algas, etc.





Marco Teórico

Los microorganismos presentes en un tratamiento biológico se pueden clasificar por su mecanismo de respiración, esto es, considerando el aceptor final de electrones en su proceso bioquímico, esta clasificación se da en aerobios, anaerobios y facultativos, un aspecto importante de los tratamientos de biopelícula que surgieron en las últimas décadas es el de que son capaces de tener ambos procesos en relativamente poco espacio ya que estos procesos se llevan en las películas formadas.

Hoy en día los desarrollos tecnológicos han permitido una amplia gama de procesos biológicos, por dar algunos ejemplos se presentan los siguientes: Reactores Bach secuenciales, bio discos, biorreactores de membrana, biofiltros aireados, reactores de biopelícula de cama móvil, lodos anaerobios de flujo ascendente y existen diversas variaciones entre estos tratamientos lo que da lugar a muchísimas tecnologías a la fecha.

Es importante decir que uno de los principales problemas de los tratamientos biológicos que a la fecha son muy usados, es la generación de lodos y su tamaño, se destaca que en los procesos anaerobios la producción de lodos es menor en comparación a los procesos aerobios además de la producción de un producto de valor comercial que es el metano que se produce en una proporción entre 65% y 70% siendo el resto dióxido de carbono (Meena et al., 2019) sin embargo el porcentaje de remoción de materia orgánica no es tan alta, por lo que un tratamiento aerobio que disminuya la producción de lodos y su tamaño, manteniendo los porcentajes altos de remoción, sería un buen proceso a considerarse actualmente.





## Centralización

Como lo demuestra la historia, el crecimiento urbano y la expansión de las grandes ciudades acarrearán diversos problemas en cuanto a infraestructura y logística, las necesidades actuales en las grandes urbes son el suministro de agua de alta calidad, la recolección que incluye aguas residuales y agua de lluvia y los tratamientos avanzados que requiere antes de ser descargada en un cuerpo de agua todo esto como una necesidad de salud pública.

Las plantas de tratamiento municipales y los sistemas de gestión que se han desarrollado a través de los años en los países industrializados son caracterizados por la adquisición de agua fresca de zonas protegidas como agua subterránea y reservorios, la purificación controlada de agua y sana distribución de esta con alta calidad durante todo el año, la recolección de aguas residuales y agua de lluvia por medio de alcantarillas, el transporte del agua residual colectada fuera del área urbana, los tratamientos avanzados, el control del agua tratada antes de la descarga a la superficie de cuerpos de agua y finalmente tratamiento y utilización o deposición controlada de los lodos generados en los procesos.

La gestión de agua potable y agua residual centralizada se le llama así debido a que toda el agua a ser distribuida en una zona urbana es purificada en una localización definida y el agua residual generada es recolectada y posteriormente enviada a una planta para su tratamiento y descarga, este procedimiento es el más común y puede observarse esquematizado en la fig. 1, en esta se aprecia un ciclo, donde el agua que es extraída ya sea superficialmente o subterránea es canalizada







Marco Teórico

Un factor clave en estos tratamientos centralizados es el control, sabiendo que la violación de calidad y cantidad estándar podría tener serias consecuencias a la salud. Las personas podrían contraer enfermedades cuando los organismos patógenos no son removidos correctamente del agua antes de su distribución, problemas de intoxicación a largo plazo pueden ser desarrollados cuando sustancias dañinas tales como metales pesados, hidrocarburos clorados o sustancias farmacéuticas entran al sistema en cantidades en exceso. Con el deterioro de la salud pública la economía de una región se ve amenazada y el bienestar público decrece, por lo que, no es un problema menor. La violación en los límites permitidos para descarga podría causar deterioro en la calidad del agua superficial y en otras partes lejos de las descargas donde el agua es usada como un recurso para beber o por ejemplo la purificación del agua requeriría un mayor esfuerzo lo que incrementaría los costos (G. Zeeman, 2001).

En cuanto a los costos la relación costo beneficio de los sistemas centralizados aumenta cuando el costo de construcción, mantenimiento, distribución y recolección se toman en cuenta. El costo de la instalación de suministro de agua neto y el sistema de alcantarillado es casi un orden de magnitud mayor que el costo de construcción de las instalaciones de la planta de tratamiento (G. Zeeman, 2009). Resulta más barato por ello los sistemas descentralizados sin embargo no por ello son capaces de ofrecer el servicio que se requiere en las grandes urbes.

Debido a las ventajas de construcción y gestión para abastecer y recolectar agua y para atender las necesidades de tratamiento, los gobiernos han optado por la construcción de plantas de tratamiento centralizadas para estos fines. Sin embargo,





Marco Teórico

algunos estudios argumentan como se ha mencionado antes que los sistemas centralizados son soluciones costosas, esto esta normalmente asociado con el transporte de larga distancia, la red de distribución a gran escala, la complejidad del diseño, el alto costo de inversión, los altos requisitos operativos y de mantenimiento, la falta de flexibilidad y el potencial de alguna falla catastrófica (Chen et al., 2017)

## **Descentralización**

La necesidad de contar con fuentes de agua debido al crecimiento poblacional ha llevado al requerimiento de alternativas para el reúso del agua residual urbana esta necesidad se extiende por muchas regiones y en un futuro se espera que este requerimiento aumente cada vez más.

Debido al tamaño que poseen las plantas centralizadas resulta difícil ubicarlas, por lo que cuando una planta se instala se espera que atienda toda una región, esto ocasiona problemas de conectividad, ya que la infraestructura requiere de toda una red para poder canalizar el agua residual a la planta de tratamiento (Lofrano & Brown, 2010).

Tomando en cuenta todo lo que conlleva en cuanto a costos, la operación de una planta centralizada y los demás elementos requeridos, se puede ver la principal desventaja, como ya se mencionó, los costos de construcción de una red de suministro y de alcantarillado para recolección de agua residual y pluvial es casi 10 veces el costo de la construcción de las instalaciones para el tratamiento. En México las plantas de tratamiento centralizadas llevan operando décadas sin embargo





Marco Teórico

según las metas a lograr para el año 2018 en cuanto al tema de alcantarillado, fue una cobertura de 93% de alcantarillado nacional, este porcentaje no es homogéneo ya que mientras en zonas urbanas la meta se fijó en una cobertura de 96.6% en las zonas rurales la meta fue lograr el 80% (IDOM Counsulting Engineering Architecture, 2018). Esto indica que las plantas centralizadas son construidas y puestas en operación sin que se tenga una red completa para que pueda ser atendida la descarga de la región en donde opera.

Otro de los problemas que acarrearán las plantas de tratamiento centralizadas y más específicamente las plantas que utilizan lodos activados en su tren de tratamiento es la generación de los mismos, ya que a diferencia de otro tipo de materia orgánica que bien puede ser aprovechada como composta los lodos que se generan en las plantas de tratamiento contienen materiales dañinos para el ambiente en esta matriz se encuentran organismos patógenos productos químicos de uso doméstico, productos farmacéuticos e incluso metales pesados, claro en cantidades pequeñas a estos lodos se les da un tratamiento previo para su disposición según la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Estos problemas hicieron surgir nuevos retos a solucionar, una alternativa para atender los problemas de las zonas que por su ubicación y el agua residual generada no recibe ningún tratamiento, es el uso de plantas de tratamiento descentralizadas con tecnologías que minimicen los problemas como la generación de lodos tales tecnologías pueden ser de biopelícula fija o móvil, humedales artificiales, de bio membrana u oxidación avanzada por mencionar algunos.





Marco Teórico

El panorama de las plantas de tratamiento centralizadas es que estas no pueden cubrir la demanda generada por toda una comunidad ya que el gobierno no puede proveer una conexión a la red de recolección para el 100% de las viviendas, espacios comunitarios, escuelas, zonas de trabajo y demás sitios de generación de aguas residuales.

Es necesario la implementación de sistemas de tratamiento que no sean centralizados, es decir que no requieran de conexiones de recolección y distribución ya que se diseñan y construyen localmente. Por lo mismo estas plantas descentralizadas tienden a ser pequeñas para ser instaladas *in situ* un ejemplo es el caso RBT que se estima su costo de producción de agua residual entre 6.40 y 10.5 \$ por m<sup>3</sup>. En la Fig. 2 se puede apreciar el ciclo de uso tratamiento y reúso que puede llevarse a cabo en un sistema descentralizado, es importante destacar que el agua tratada localmente tiene el alto potencial de reúso esto le permite usarse en el riego o en actividades domésticas que no demanden una calidad de agua potable.



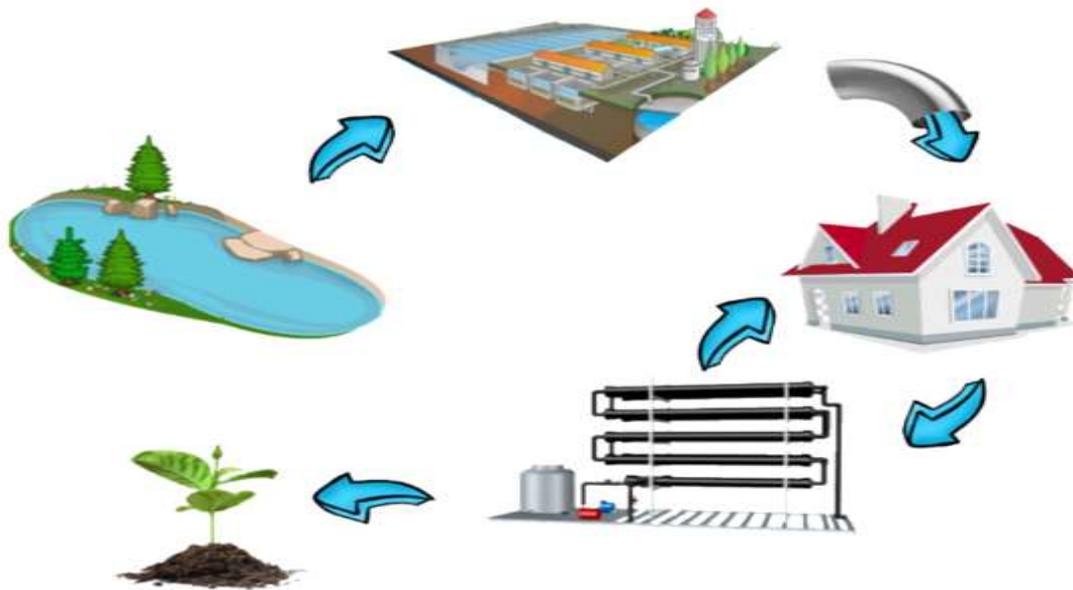


Fig. 2: Esquema simplificado del ciclo de agua en un sistema descentralizado. Elaboración propia.

Algo que se sabe, es que la mayor parte de las plantas descentralizadas se localizan en comunidades rurales, esto sin embargo no significa que el problema sea mayor o más relevante en estos lugares ya que en las zonas urbanas existen puntos donde es necesario la implementación de tratamientos descentralizados.

Algo que se podría hacer para que un proceso de tratamiento de agua residual descentralizado sea más valioso es verlo a través de la política de criterio integral, IPP por sus siglas en inglés. Esta es una iniciativa de la unión europea cuyo objetivo es reducir la carga ambiental de productos y servicios a través de su ciclo de vida (Martin , Alex , Aleksandra , & Inga , 2001). Por lo que una tecnología que sea de larga duración y gran impacto sería valiosa.





Marco Teórico

Las tecnologías actuales con las que cuentan los sistemas descentralizados presentan grandes contrastes, por ejemplo por un lado se tiene sistemas con una tecnología muy pobre como puede ser las letrinas o las cámaras de tanques sépticos, se tiene de igual manera sistemas que asemejan procesos naturales como estanques artificiales, humedales o plantas de infiltración vertical y en contraste con los procesos mencionados inicialmente existen soluciones con otras técnicas, estas son de gran variedad y se podría decir que son adaptaciones de tecnología más reciente a pequeña escala.

Para obtener un proceso amigable en términos ambientales enfocándonos en tratamientos descentralizados se tiene que tomar en cuenta la calidad del agua, la operación de la planta de tratamiento y la supervisión y control por parte de las autoridades (G. Zeeman, 2001). Debe de quedar claro que todos los desarrollos tecnológicos van encaminados hacia un manejo del agua que sea integrado, ecológico y económicamente sano.

Lo anterior debe ir de la mano con cambios de conducta en el cuidado del agua por ejemplo para fomentar la cultura de reúso, conciencia de ahorro y aprovechamiento de agua. En algunas zonas esto se vería reflejado en el agua freática que podría recargarse correctamente y a su vez eso se reflejaría en el crecimiento de cierta flora local dependiendo su profundidad y sus características fisicoquímicas (Muñoz Reinoso, 1995), de igual manera en las zonas donde el agua escasea, una reducción en el suministro, apoyado con tratamiento y reúso local, además de generar conciencia también ahorraría dinero público ya que en estas zonas el agua recibe tratamientos más costosos.





El panorama actual sugiere que el uso de plantas descentralizadas aún es insuficiente y su oportunidad para remediar problemas está en latencia. De la mano al requerimiento de plantas descentralizadas se encuentra la necesidad de plantas compactas, por ello se debe de desarrollar la tecnología necesaria para este fin y por ello alrededor del mundo es común que se necesiten pequeñas plantas de tratamiento de agua descentralizadas (De Anda Sánchez, 2017).

### **Pequeñas plantas de tratamiento de agua.**

No existe como tal una clasificación de tamaños en cuanto a las plantas de tratamiento de agua residual pero se puede manejar como pequeñas plantas a aquellas que atienden una cantidad  $\leq 50$  PE (población equivalente) (Langergraber et al., 2018).

El término de población equivalente se refiere a una unidad estandarizada tomando en cuenta la cantidad de oxígeno consumido durante la biodegradación de la materia orgánica presente en el agua residual producida por una persona en 24 horas (OECD, 2019)

A partir de esta unidad estándar es posible calcular la PE y usarlo para comparar u ordenar las capacidades de las plantas de tratamiento.

Para determinar la población equivalente de un efluente se utiliza la siguiente ecuación

$$PE = \frac{Q * DBO}{a} \quad Ec. 1$$

Donde:





- $PE = Población\ equivalente\ (hab)$
- $Q = Flujo\ volumétrico\ \left(\frac{L}{d}\right)$
- $DBO = Demanda\ biológica\ de\ oxígeno\ \left(\frac{g}{L}\right)$
- $a = Constante\ equivalente\ a\ 54\ \left(\frac{g}{d*hab}\right)$

En Austria casi toda la población es atendida por 1865 plantas de tratamiento con una capacidad de más de 50 PE pero cabe destacar que el 5% que no es atendida por esas plantas, sus efluentes reciben tratamiento de 27 400 pequeñas plantas con capacidad menor a 50 PE (Langergraber et al., 2018) esto quiere decir que por cada planta de tratamiento de gran capacidad hay aproximadamente 14 pequeñas plantas de tratamiento, las tecnologías de estas últimas son muy variadas pero es importante resaltar que el 22.7% sólo son tratamientos primarios en su mayoría tanques sépticos y el 25.6% pertenecen a lodos activados convencionales por lo que el requerimiento de mejores tecnologías es latente.

Para visualizar la idea de las pequeñas plantas de tratamiento en cuanto a dimensiones se tiene el ejemplo de una planta piloto que utiliza un reactor anaerobio de flujo ascendente en Bolivia que para tratar la demanda de 800 personas ocupa un volumen de 30 m<sup>3</sup> (Hoyos & Ivan, 2000) y aunque a esa escala la eficiencia de remoción y reducción de lodos es significativa el espacio no se reduce mucho en comparación a usar alguna otra tecnología convencional.

La oportunidad de desarrollar tecnología para pequeñas plantas de tratamiento es evidente y por ello se debe buscar un producto que satisfaga las necesidades existentes para estas plantas.





## **Desarrollo de un nuevo producto**

Para desarrollar un nuevo producto se puede tomar ideas previas imitando o se puede innovar con nuevos diseños, utilizando nuevas tecnologías integrales. Se define el diseño como el acto de formalizar una idea o concepto en información tangible, esto es distinto de hacer o construir, elevando el concepto de un artefacto al punto antes de que comience el proceso de convertirlo en una forma física o incorporada o bien desde una perspectiva de ingeniería. El diseño es la aplicación de conceptos científicos, matemáticas y creatividad para visualizar una estructura, una máquina, un sistema o un artefacto que realiza una función preespecifica. El diseño se utiliza de forma generalizada, su significado es algo diferente para un ingeniero que, para un diseñador industrial, mientras que un ingeniero se preocupa más por la disposición de las piezas, la mecánica de las partes dispuestas, y su funcionalidad cuando se juntan, un diseñador industrial está más preocupado por la apariencia de un artefacto. En el diseño de productos para el consumidor, tanto la forma como la función son importantes, ambas disciplinas (ingeniería y diseño industrial) son cruciales en el desarrollo de la información final a partir de la cual se puede hacer un producto. El grado en que el diseño de un producto depende de la ingeniería o del diseño industrial viene determinado por el propio producto. Un producto que se basa principalmente en la estética, como productos textiles, tarjetas de felicitación y muebles, está dentro del espectro de un diseñador industrial, mientras que los productos que tienen una función dominante, como motores de automóviles, cimientos de edificios y trenes de engranajes, están dentro del dominio de ingenieros. Los productos de consumo dependen tanto de ingenieros como de





Marco Teórico  
diseñadores industriales para el éxito, de ingenieros para la función y de  
diseñadores industriales para la estética (Mital et al., 2014).

Por lo anterior se entiende que para que el desarrollo de un producto tenga éxito debe existir una sinergia entre el diseño funcional y la apariencia del producto.

Ahora bien, en la parte tecnológica se puede basar en el conocimiento previo existente sin perder de vista el punto de innovar esto puede llevarse a cabo si se ve en qué consiste la innovación, algunas definiciones son las siguientes: La innovación en un producto puede verse como el resultado de la combinación de conocimiento existente con nuevo conocimiento (Kogut & Zander, 1993) o la recombinación novedosa de conocimiento existente (Galunic & Rodan, 1998).

A partir de esto se puede tener una visión general de lo que se debe tomar en cuenta para el desarrollo de un nuevo producto y puede ser aplicado a su diseño y construcción.

### **Diseño de Tecnologías Compactas, caso RBT.**

Las tecnologías compactas para tratamiento de aguas residuales son muy variadas e incluyen diversos procesos. En la actualidad las tecnologías que basan principalmente sus tratamientos en biopelículas son diversas igualmente, desde varios tipos que usan películas móviles hasta muchos otros con películas fijas, dentro de este marco la tecnología del reactor biológico tubular es de las más novedosas por así decirlo.

Una biopelícula puede ser definida como una comunidad de agregados celulares que se encuentran agrupados por una matriz extracelular, esta matriz recibe el





nombre de glicocalix y es un conjunto de glicoproteínas y glicolípidos cuya función es sujetar las células adsorbidas a un soporte. Esto da como resultado una estructura compleja que presenta huecos intersticiales donde se da un transporte de nutrientes de la materia orgánica y oxígeno que los microorganismos usan para su desarrollo (Lewandowski et al, 1994), cabe destacar que la estructura de la biopelícula es altamente heterogénea. Un aspecto importante en esta tecnología es el área superficial, donde se desarrolla la biopelícula, que está en contacto directo con el agua a tratar y la protección de ésta, debido a que esfuerzos cortantes del agua o impactos físicos pueden desprenderla (Welter et al., 2004).

Para innovar en el campo tomando en cuenta las tecnologías de biopelícula anteriores y haciendo una recombinación de los conocimientos previos y nuevos, el caso de la tecnología RBT se desarrolla con el uso de una fibra no tejida como soporte polimérico para una biopelícula con una configuración especial que permite el flujo transversal en los tubos con la velocidad requerida calculada a partir de un flujo teórico basado en experimentaciones previas.

El uso de fibra no tejida ha mostrado proporcionar una buena y prolongada adherencia de las matrices extracelulares que usan los microorganismos para adherirse a las superficies y desarrollarse además que debido a su porosidad el área superficial neta para fijación de la biopelícula es considerable, esta misma porosidad permite que la biopelícula formada en la fibra tenga cierta protección a ser desprendida por los esfuerzos cortantes producidos por el flujo de líquido y aire éstas características la hacen idónea para la función de soporte para la tecnología estudios previos demuestran que en la fibra no tejida se tiene una acumulación de





Marco Teórico

microorganismos aproximada de 1.4 gramos de biomasa por cada gramo de soporte (García González, 2019).

El antecesor más reciente de esta tecnología se instaló en una planta de tratamiento de agua residual de la Universidad Nacional Autónoma de México, en esta se trataba en su mejor rendimiento 300 l/h que era una fracción del agua recolectada en ciudad universitaria y algunas colonias aledañas.

Este modelo preliminar del reactor puesto en marcha constaba de 5 módulos tubulares donde se encontraba la fibra polimérica de soporte, con un volumen total de 225 L. El reactor era alimentado a través de una bomba con  $\frac{1}{2}$  hp de potencia mientras que el oxígeno se suministraba a través de un tubo de Venturi, el diagrama de proceso se esquematiza en la Fig. 3.

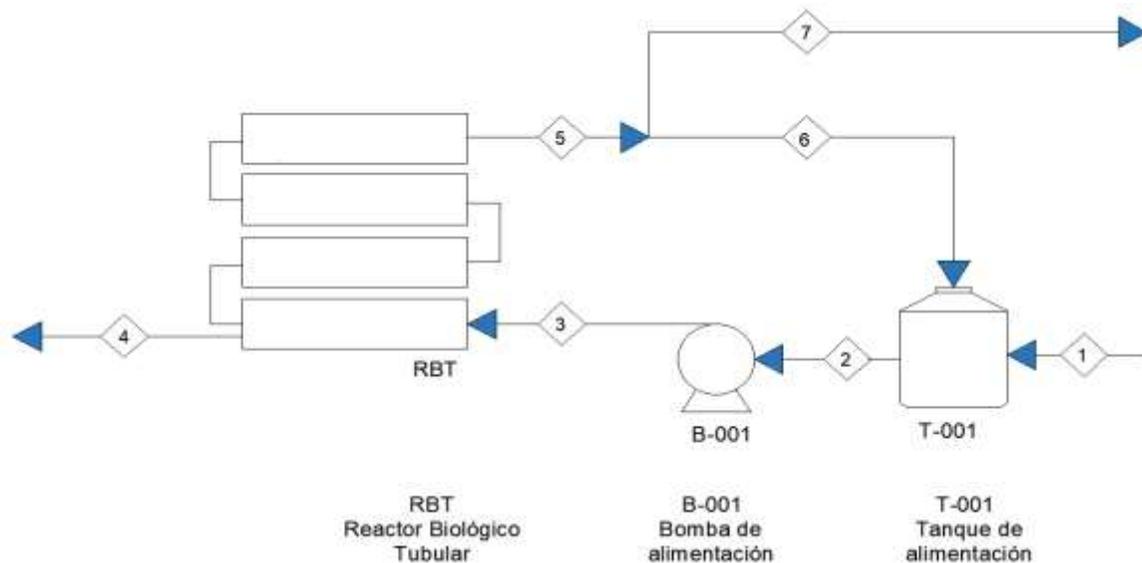


Fig. 3: Diagrama de flujo de proceso del caso RBT previo.





Marco Teórico

El acomodo de la fibra en los internos en este modelo se realizó intercalando tubos de PVC con fibra y separando esto con pedazos de la misma fibra como se puede apreciar en la Fig. 4.



Fig. 4: Fuentes Cuevas A. A. "Estructura de fibra no tejida dentro del reactor tubular de biopelícula", 2017, tesis de licenciatura, p. 60

En cuanto a operación el reactor trabajó en 3 valores de flujo de salida diferentes, 18 L/min, 9 L/min y 5 L/min los cuales se variaron añadiendo recirculación al proceso, 0%, 50% y 91% respectivamente. Mientras que el tiempo de residencia en el reactor fue 11 minutos, 22 minutos y 55 minutos para cada caso.

Debido a que el aire suministrado por el tubo de Venturi era insuficiente se realizó un cambio en la potencia de la bomba optando por una bomba de 1 HP.

De la evaluación operacional del reactor se llegó en ese entonces a la conclusión que los mejores resultados de remoción de materia orgánica se dan a una mayor recirculación, en cuanto a nitrógeno amoniacal se logra una remoción completa al iniciar recirculación en el proceso (Fuentes, 2017).





Marco Teórico

En cuanto a la eficiencia en la operación real de la planta piloto, se analizaron los parámetros de DQO y nitrógeno amoniacal dando como resultados que el nitrógeno amoniacal se elimina cerca del 100% mientras que la eliminación de DQO fluctúa, pero se alcanzaron remociones de hasta el 98.43%.

Para evitar el taponamiento por la acumulación de lodos se realizaba una purga semanal.

Hay dos consideraciones que tomar en cuenta para el buen funcionamiento de las tecnologías de biopelículas, por un lado, el oxígeno disuelto, un rango óptimo sería de 0.2 a 2.0  $\frac{mg}{L}$  para así se realice la nitrificación del nitrógeno amoniacal por microorganismos aerobios, una baja concentración llevaría a limitar la oxidación del amonio. En cuanto al grosor de la biopelícula, en un grosor menor de 100  $\mu m$  no se formaría una capa anaeróbica y la remoción de contaminantes será menor, un grosor adecuado es de 700  $\mu m$  que se obtiene a través del nivel de oxígeno disuelto y el tiempo de operación de un reactor (Liu et al., 2017).

La tecnología del reactor biológico tubular ha demostrado ser una mejor alternativa en comparación con los tratamientos de lodos convencionales, esto se ve en los resultados arrojados por la planta piloto el espacio ocupado en dicha planta era de 40 centímetros por 2.5 metros de largo y 2.3 metros de alto, dando un efluente libre de nitrógeno amoniacal y una alta remoción de DQO. Cuando el reactor biológico tubular se operó en forma continua se obtuvo excelentes resultados de remoción de  $N-NH_4$ , donde la remoción de nitrógeno fue del 100% considerando un rango de cargas de  $N-NH_4$  de 0.5 a 20  $g N-NH_4 / m^2d$ . En términos de DQO, las remociones fueron de 50% a 98,43% con cargas orgánicas cercanas a 60  $g DQO / m^2d$  (Fuentes,





Marco Teórico

2017). Por ello es una oportunidad aprovechable en los tratamientos de agua además con la mejora e innovación en estos reactores, se pueden desarrollar procesos nuevos logrando trenes de tratamiento completos y así tratar agua residual y llevarla a calidad de reúso sin requerir de mucho espacio como se documentó en sus antecedentes de operación, esto es una oportunidad para intervenir en problemas ambientales o sociales relacionados con la contaminación de cuerpos de agua o con la necesidad del líquido en algunas comunidades.

Otro aspecto importante de impacto de la tecnología del reactor biológico tubular puede ser el reúso de agua, se sabe que la cultura del tratamiento y reúso aún es muy pobre alrededor del mundo, un dato a considerar para comprender como impactaría de manera significativa es que la agricultura que incluye la irrigación, el mantenimiento del ganado y la acuicultura es por mucho la actividad que más consume agua representando el 69% del agua anual sustraída globalmente, la industria incluyendo la generación de energía el 19% y los hogares el 12% (United Nations, 2018) teniendo esto en cuenta mucha del agua usada en estas actividades en especial la agricultura no demanda una calidad potable por lo que bien podría usarse agua tratada lo que se reflejaría en un menor consumo del agua extraída de reservas y a su vez permitiría se recarguen evitando así la desaparición de fuentes de agua.

En el año 2015 en México existían 2477 PTARM con lo que se logró dar cobertura de tratamiento a un caudal de  $120\,902.2 \frac{L}{s}$  esto representa el 57.0% de las aguas residuales municipales. (Comisión Nacional del Agua, 2015)





Marco Teórico

Tomando en cuenta lo anterior en ese año, 91 206.9  $\frac{L}{s}$  de aguas residuales municipales eran descargadas sin recibir ningún tipo de tratamiento, esa cantidad se puede traducir en oportunidad que fue desperdiciada, y aun el agua tratada en su mayoría no se aprovechó su potencial de reuso, la tecnología RBT podría aprovechar esos sitios donde las aguas no reciben ningún tipo de tratamiento una vez desarrollada más su tecnología y mejorando su capacidad, para ello el siguiente paso es el desarrollo en forma de los internos de reacción para que sean comerciales y puedan tener un sistema de producción definido, para ello lo primero es crear un prototipo de los internos del reactor.

### **Prototipado e impresión 3D**

Originalmente las impresoras 3D eran utilizadas principalmente para la creación de prototipos rápidos, con el paso de los años estas tecnologías han ido adquiriendo un papel cada vez más importante en procesos de manufactura. A medida que la tecnología mejoraba, era posible utilizar impresoras 3D no sólo para hacer prototipos, sino también para fabricar herramientas y moldes usados para manufactura "tradicional". Entonces se hizo posible y económico, en algunos casos, fabricar productos finales completamente con impresoras 3D. Finalmente, la llegada de las impresoras 3D personales lo ha hecho posible para fabricar directamente en casa esto le da una ventaja que permite que con un presupuesto relativamente bajo se desarrolle y manufacture un producto.

Para entender el proceso de impresión 3D se puede dividir en etapas: la primera etapa implica la creación de un modelo digital del objeto a imprimir. Esto





Marco Teórico

generalmente se hace con ayuda de computadora generando un archivo de diseño asistido por computadora, CAD por sus siglas en inglés, posteriormente en una segunda etapa el archivo es procesado por la impresora que con movimientos axiales deposita un filamento capa por capa que es el material con el que se materializa el modelo computacional.

En cuanto a los materiales con los que trabajan las impresoras 3D, hoy en día, el más utilizado es el plástico (ABS, PLA, Nylon), pero aleaciones metálicas, cerámicas, partículas de madera, sal e incluso azúcar y chocolate se pueden utilizar para imprimir. Actualmente, la mayoría de las impresoras ya sea de grado industrial o de consumo, sólo pueden imprimir con un material a la vez, pero en los últimos meses, varias impresoras que pueden imprimir con varios materiales simultáneamente se han introducido en el mercado (Rayna & Striukova, 2016).

Si bien la creación rápida de prototipos se utilizó al principio (debido al costo) principalmente por parte de las grandes corporaciones, la disminución progresiva del precio condujo a una adopción más amplia. Hoy en día, todas las impresoras 3D en el rango de \$ 1000 a 4000 dólares están dirigidos a pymes y emprendedores en necesidad de creación de prototipos. La calidad de la creación de prototipos también ha mejorado y hoy en día, las impresoras de gama alta (que cuestan \$ 200,000 o más) pueden construir prototipos de múltiples materiales completamente funcionales de una sola vez (Rayna & Striukova, 2016), de igual manera es posible utilizar una impresora de gama media y a partir de piezas impresas y otros materiales, formar un prototipo funcional por arriba de la calidad de un prototipo rápido.





Marco Teórico

Para el desarrollo de un prototipo, la impresión 3D presenta ventajas con relación a la tradicional inyección de plástico estas ventajas se relacionan con la rentabilidad y la velocidad. A diferencia de los procesos de moldeo por inyección que requiere moldes costosos, la impresión 3D implica relativamente bajos costos fijos. Dado que no requiere herramientas, formas o punzones costosos, es particularmente rentable para tiradas de producción muy pequeñas. Esto permite a las empresas utilizar la impresión 3D de forma rentable para cumplir con los pedidos personalizados de forma económica y atender mercados especializados (Berman, 2012).

Un aspecto importante para tomar en cuenta es que mientras objetos pueden ser visto en tres dimensiones en una pantalla de computadora, muchos diseñadores y planificadores de nuevos productos o proyectos preferirían en lugar de examinar, poder tocar y sostener un elemento antes de comprometerse con una gran inversión o una producción en masa. A diferencia de la arcilla, maquetas de madera o metal que en el pasado han sido creadas a mano, las impresoras 3D pueden producir objetos con partes móviles como un modelo funcional de una cadena de bicicleta o incluso una pequeña caja de cambios y pueden utilizar varios materiales como un control remoto de plástico con botones de goma claro con una impresora de alta gama. Una segunda mayor ventaja en el desarrollo de prototipos es la capacidad de Impresión 3D para producir prototipos de forma rápida y hacer diferentes versiones, para el consumidor o para el laboratorio de pruebas y para diferentes segmentos de mercado, sin la necesidad de costosos cambios de herramientas de igual manera pueden hacerse modificaciones que no requieren que se desarrolle desde 0 el prototipo si no que las modificaciones se hacen directamente en el





Marco Teórico

archivo previo CAD por ejemplo en el desarrollo de los internos anteriores del RBT no existe un archivo o modelo físico y en caso de que se quisieran volver a construir no se podría reproducir. La impresión 3D y el desarrollo de prototipos permiten que exista algo previo a partir de lo cual volver a construir los internos o piezas necesarias si en algún momento se necesitara.

Un aspecto importante en la fabricación de prototipos rápidos o bien prototipos armados a partir de impresión 3D con adición posterior de otros materiales, donde las piezas impresas 3D son la columna vertebral, es la posibilidad de manejar el diseño como un archivo de estereolitografía o STL por sus siglas en inglés ya que este archivo es compatible con otras técnicas de producción por ejemplo la inyección de plástico donde si un prototipo es aprobado, puede reproducirse fácilmente a gran escala a través del archivo.





## Metodología

La metodología realizada se dividió en 3 etapas:

La etapa I que corresponde al diseño de las piezas internas que conforman los módulos de aireación reacción, usando los fundamentes previos para realizar sus dibujos hasta su modelado 3D en AutoCAD.

La etapa II que corresponde a la construcción de los módulos de aireación y de reacción del Reactor Biológico Tubular, desde la impresión de las piezas hasta el ensamble con otros materiales para formar los prototipos.

La etapa III que corresponde a la construcción de la estructura del Reactor Biológico Tubular y pruebas de montaje de los módulos de aireación y de reacción en la misma.

La etapa I se realizó con la asistencia del programa AutoCAD consistiendo a grandes rasgos en la conceptualización de las ideas fundamentadas en un análisis de datos de operación y experimentación previa de la tecnología RBT para implementarlas en los módulos, se realizaron dibujos a partir de los cuales se crearon sólidos digitales que pudieran ser procesados por una impresora 3D y así fabricar las piezas que servirán para la construcción de un prototipo.

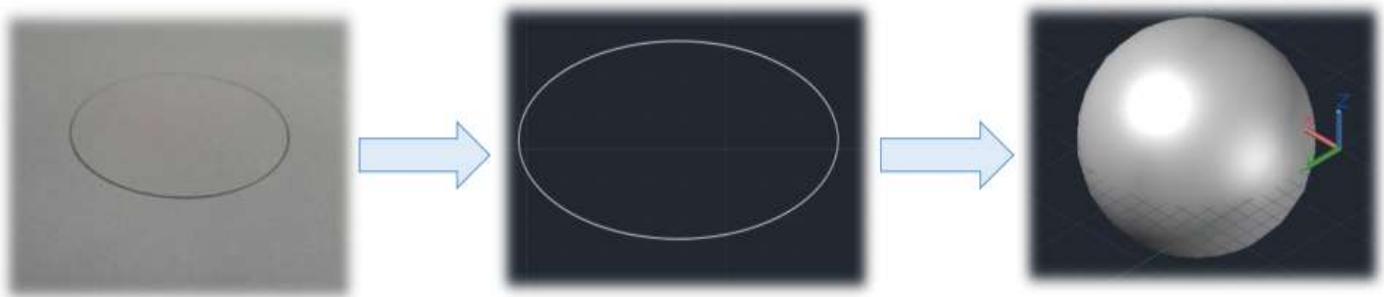
Los diseños desarrollados tenían que cumplir con ciertas características obtenidas a partir de estudios previos con el RBT, estas se tomaban en cuenta previamente al momento de realizarse un bosquejo conceptual, esta etapa pareciera ser la más importante debido a que en esta se definían las necesidades y cómo el diseño





propuesto serviría para cubrirlas, posteriormente se explica más a detalle estas consideraciones.

Un esquema de diseño se muestra en la Fig. 5 primero realizando el bosquejo de la idea en papel después trasladarlo a dibujo digital en 2D y posteriormente crear el modelo 3D.



*Fig. 5: Esquema de elaboración de un diseño 3D. Elaboración propia.*

La etapa II se realizó teniendo una idea clara de lo que se buscaba en el proyecto con esto se prosiguió a la impresión de las piezas previamente realizadas en la etapa I, con las piezas listas se trabajó en lograr lo requerido, a partir de aquí se realizaron pruebas para el desarrollo del prototipo como por ejemplo la búsqueda del pegamento adecuado para fijar las piezas y el soporte polimérico. En esta etapa, la realización de estas pruebas para el desarrollo del prototipo fue crucial ya que cada nueva oportunidad retroalimentaba el diseño y se volvía a la etapa I para posteriormente aplicar lo aprendido y desarrollar el prototipo una vez más, para ser probado.





#### Metodología

La etapa III en esta etapa se construyó la estructura principal del reactor biológico tubular esto con el fin de probar que el prototipo desarrollado pueda introducirse en los tubos específicos del reactor y retirarse posteriormente. Se realizó con un segmento representativo que fue construido, usando los internos diseñados en la etapa I estos una vez utilizados en la construcción del prototipo en la etapa II, este prototipo se introdujo en la estructura armada para específicamente constatar que era posible introducir y retirar el prototipo con facilidad, para la construcción de la estructura se hizo un arreglo de 8 tubos de 6" de PVC cédula 80 tomando en cuenta sus diámetros y perfil se realizó un modelo 3D y a partir de este es que se construyó la estructura.

Un esquema del proceso simplificado de la metodología seguido se muestra en la Fig. 6, se observa el ciclo de mejora continua que se usó para llegar al prototipo final.



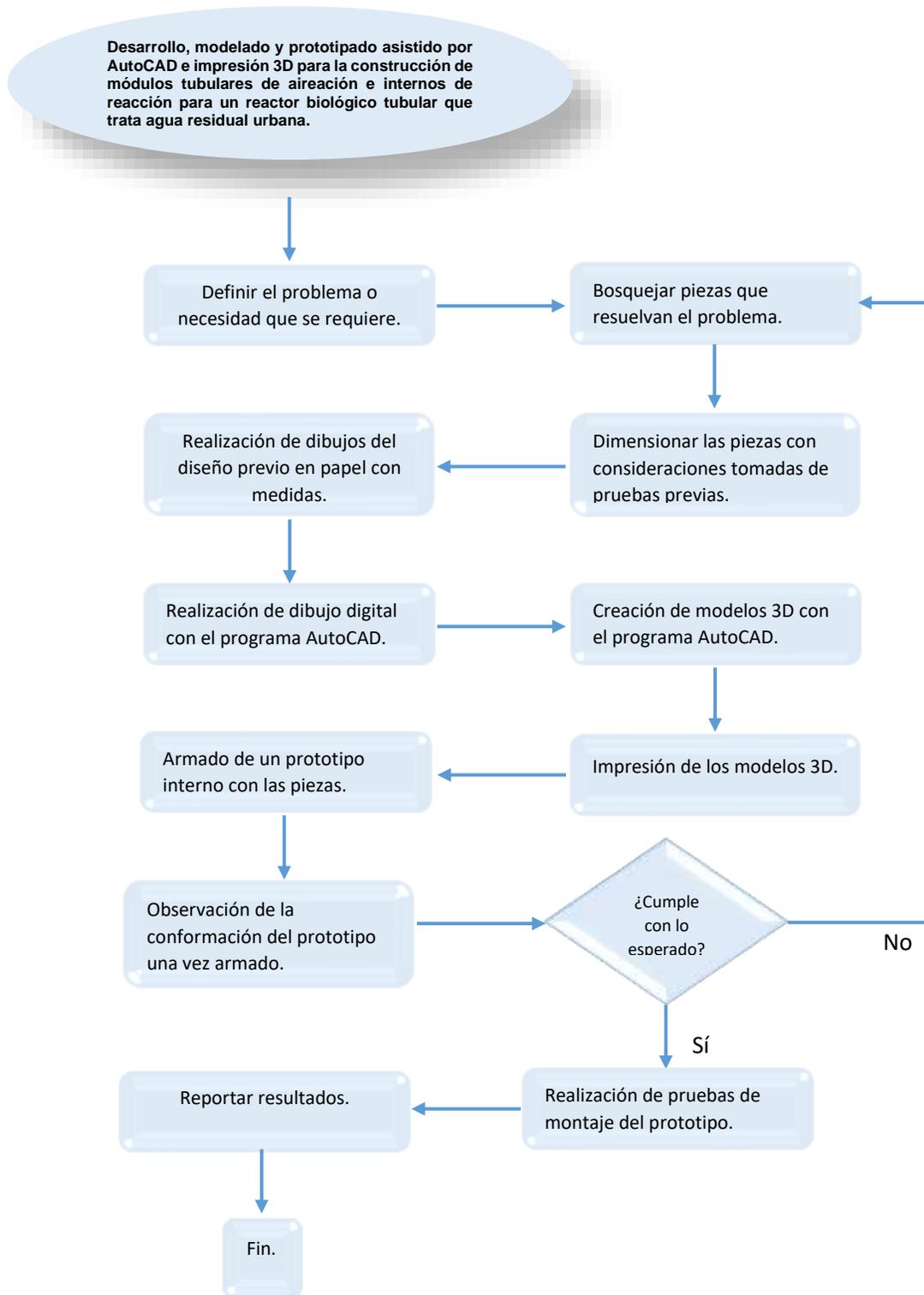


Fig. 6: Diagrama de flujo de la metodología de mejora continua aplicada en este trabajo.





## **Desarrollo**

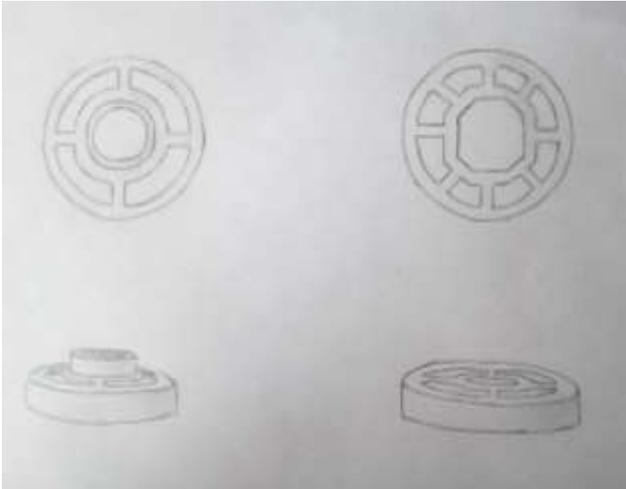
### **Etapa I: Diseño de las piezas internas del RBT**

#### **Diseño de modelos 3D en AutoCAD para soporte del difusor de aire**

El difusor debe distribuir el aire de forma radial equidistante para lograr la concentración de oxígeno disuelto deseada y que esta concentración sea lo más homogénea a lo largo del reactor, para ello debe permanecer en el centro del tubo base del reactor biológico tubular (RBT), con esta idea en mente se realizó el diseño de modelos para soportes del difusor. Estos modelos se hicieron en el programa AutoCAD, los criterios de diseño con los que se desarrolló fueron meramente funcionales. Para estos modelos se tomaron medidas de los tubos que componen el RBT y de las geometrías del difusor de aire de burbuja fina luego se buscó dar la mayor precisión para que embonaran tanto en el difusor como en el interior del tubo del reactor biológico tubular.

Primeramente se realizaron bosquejos de una pieza que pudiera cubrir nuestra necesidad, estos bosquejos se muestran en la Fig. 7 con base a ellos se llevó a cabo la realización de un dibujo digital para posteriormente crear los sólidos en tercera dimensión para su impresión, el proceso de creación mostrado en la metodología, en la Fig. 5 es importante ya que a partir de alguna parte del proceso se pueden modificar para cambiar el resultado final según se requiera por las pruebas de construcción y montaje llevadas a cabo en el RBT en la etapa II y la etapa III.





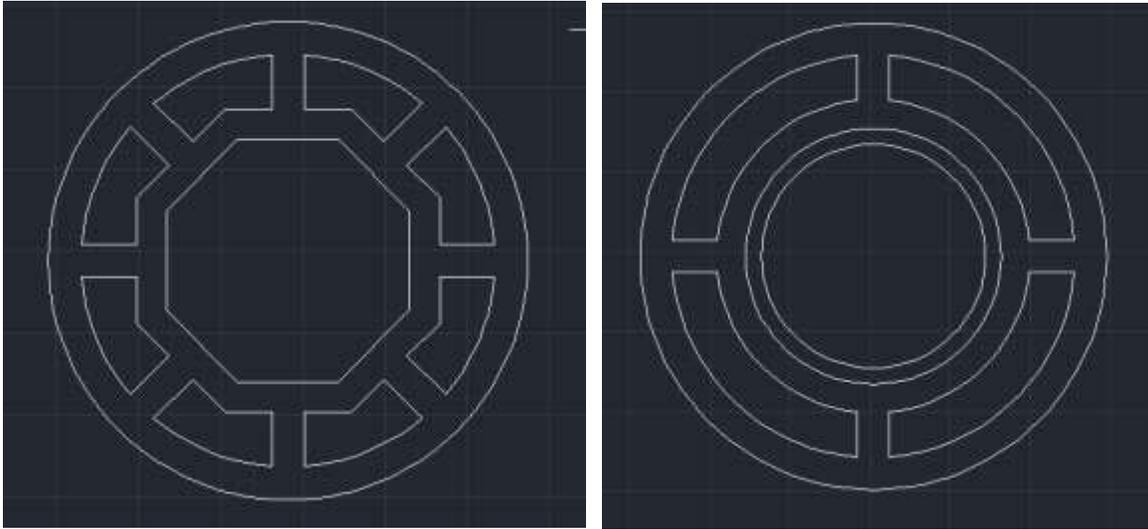
*Fig. 7: Bosquejos de los diseños a partir de las necesidades del proyecto para el difusor.*

Se buscó en este caso que los diseños fueran funcionales, los dibujos digitales se muestran en la Fig. 8 a la derecha se muestra el diseño para la parte anterior del difusor de aire, las medidas con las que se realizaron fueron tomadas del difusor esto para realizar los diámetros internos de la pieza mientras que el externo fue sobre las medidas del tubo de 6" cédula 80 perteneciente al reactor biológico tubular. En cuanto al diseño de la izquierda corresponde a la parte posterior del difusor donde es la entrada del aire, la forma de la pieza corresponde a la geometría del difusor y el diámetro del círculo exterior corresponde al tubo del reactor. El diseño se realizó dejando los espacios necesarios para permitir el flujo de agua. Otro aspecto para resaltar aquí es el hecho que se dejó un grosor considerable en las piezas pensando en el material de impresión y que es el primer acercamiento a este proceso.





Desarrollo



*Fig. 8: Diseños en 2D de las piezas de soporte del difusor realizadas en AutoCAD. Elaboración propia.*

Una vez obtenidos los dibujos digitales se procedió a crear los modelos en tercera dimensión esto con las herramientas de modelación 3D de AutoCAD teniendo los dibujos en 2D y una idea clara de lo que se está buscando, la modelación en 3D es bastante sencilla, claro una vez adquirida la práctica, en la Fig. 9 se pueden ver los diseños 3D en el programa AutoCAD estos diseños fueron los tomados para realizar la posterior impresión de las piezas. El grosor de estas piezas para darles volumen se definió considerando que 2 cm eran los adecuados para dar resistencia y estabilidad a su vez usar el menor grosor posible se traduce en ahorro de gastos debido a que se ocupa menos material y menos energía para la operación de la impresora 3D.



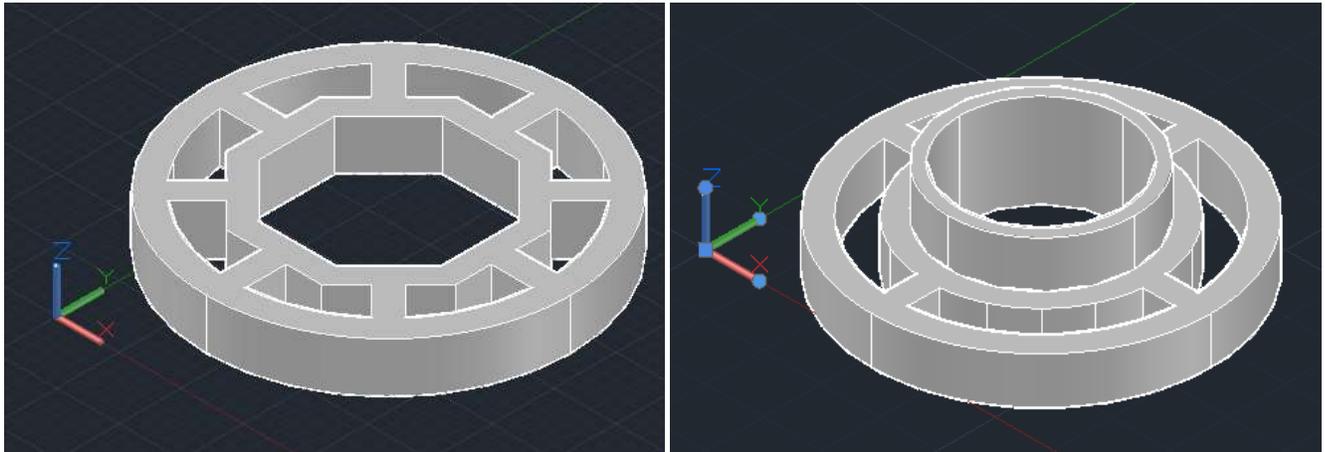


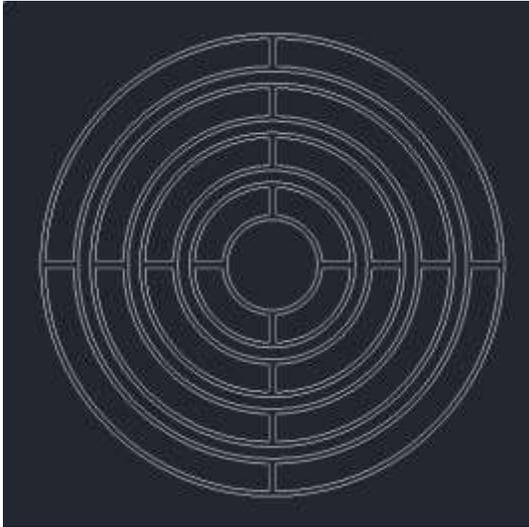
Fig. 9: Diseños en 3D de las piezas de soporte del difusor realizados en AutoCAD. Elaboración propia.

### **Diseño de modelos 3D en AutoCAD para el interno polimérico de fibra no tejida**

La conformación de la fibra no tejida que servirá como soporte de la matriz celular del tratamiento biológico debe permitir el correcto flujo del agua y buscar abarcar la mayor área superficial de contacto, el diseño de los modelos para piezas que cumplieran esta función se realizó a partir de ideas previas de la experimentación y operación del reactor biológico tubular y buscando tener un diseño más en forma para ser presentado y reproducido en masa de ser aprobado.

Se calcularon medidas a través de geometrías buscadas y de datos de balance de materia de los flujos de operación. Se realizaron los dibujos digitales pertinentes como se muestra en la Fig. 10, los dibujos de las piezas fueron concéntricos dejando la abertura necesaria para que el flujo del agua pudiera darse y el mojado de la fibra no presentara ningún problema.



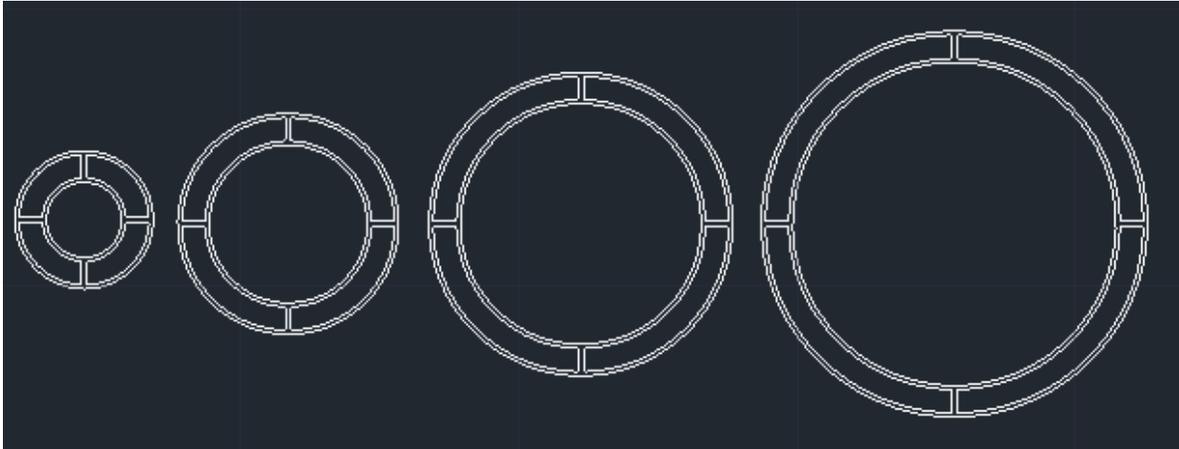


*Fig. 10: Diseño en 2D para soporte de la fibra polimérica realizado en AutoCAD. Elaboración propia.*

En la Fig.11 se muestran las piezas por separado que conformarían los soportes para la fibra, se puede apreciar que son 4 piezas, donde, entre pieza y pieza habrá una capa de fibra polimérica lo que lleva a que este diseño permita el acomodo de 3 capas de fibra debido a que la última pieza se consideró que estuviera en contacto con el tubo del reactor biológico tubular esto para que las dimensiones de flujo de agua fueran las correctas ya que se buscaba 1 cm de entre piezas para dicho flujo.

El flujo de la corriente de agua estará distribuido en las 4 piezas, en la Fig.11 de izquierda a derecha, por porcentajes de flujo se tendrá 10, 20, 30 y 40 por ciento respectivamente.





*Fig. 11: Piezas que conforman el soporte de la fibra polimérica realizados en AutoCAD. Elaboración propia.*

El diámetro interno del círculo central en el diseño corresponde al diámetro exterior de un tubo de 1" que fue medido previamente, esto con la idea de que un tubo fungiera como soporte de las piezas una vez acomodadas con la fibra polimérica este tubo se tapará para evitar que el flujo corra a través ya que esa zona no tendrá fibra y no habría ningún tratamiento ahí.

Como se mencionó antes la separación buscada para el paso de agua era lo más cercano a 1 cm para permitir el flujo correcto que se determinó a través de estudios previos, estos estudios muestran una buena difusión de oxígeno a velocidades de 0.095 m/s, por arriba de este valor el coeficiente de transferencia de oxígeno no muestra un aumento considerable, el flujo que se ha manejado es de 86.4 m<sup>3</sup>/d a partir de este flujo se determinó el área necesaria. En la Fig. 12 se muestra con simbología lo que se espera obtener con las piezas diseñadas en cuanto al acomodo de la fibra polimérica y el flujo de agua, se muestra a través del interno





Desarrollo desde el punto de vista transversal. Cabe destacar que esta representación corresponde al último modelo del prototipo, pero representa bien la idea general buscada.

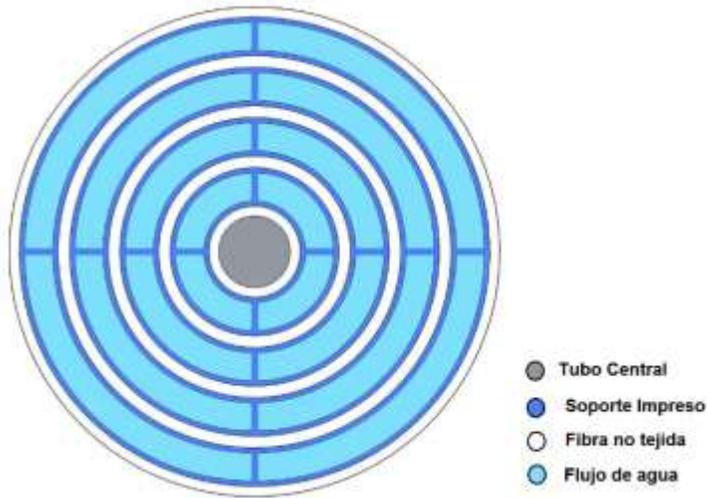


Fig. 12: Zonas del prototipo vistas desde un corte transversal. Elaboración propia.

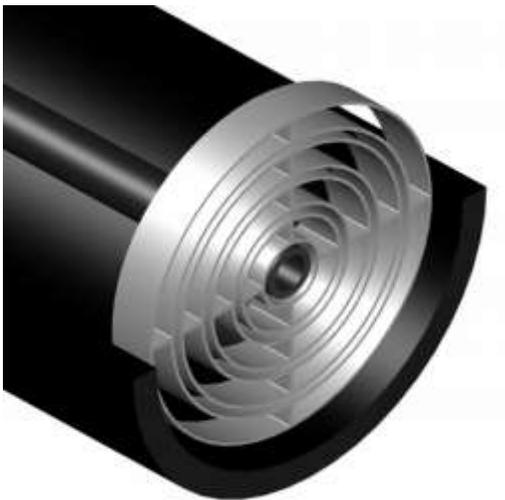
Para una mejor visualización de las piezas, se diseñó un modelo en tercera dimensión que esquematizará el acomodo de estas al interior de los tubos del reactor biológico este acomodo se puede apreciar en la Fig. 13 se observa que la distancia de los soportes diseñados es equidistante lo que permite que la fibra no pierda su configuración cilíndrica a lo largo del tubo y de esta forma se aprovecha el área superficial en ambas caras de la fibra polimérica.





*Fig. 13: Distribución esperada de las piezas en el RBT, modelo 3D realizado en AutoCAD. Elaboración propia.*

En la Fig. 14 se puede observar el diseño final con un acercamiento, como se aprecia sus dimensiones permiten que se coloquen 5 capas de fibra con la misma separación entre pieza y pieza.



*Fig. 14: Detalle de las piezas diseñadas para el soporte de la fibra polimérica. Modelo 3D realizado en AutoCAD. Elaboración propia.*





Desarrollo

A lo largo del desarrollo de la tesis se han hecho modificaciones a estos modelos por detalles que surgen al momento de hacer las pruebas de instalación en el reactor biológico tubular, se definirá a partir de ahora 2 modelos diferentes que se elaboraron.

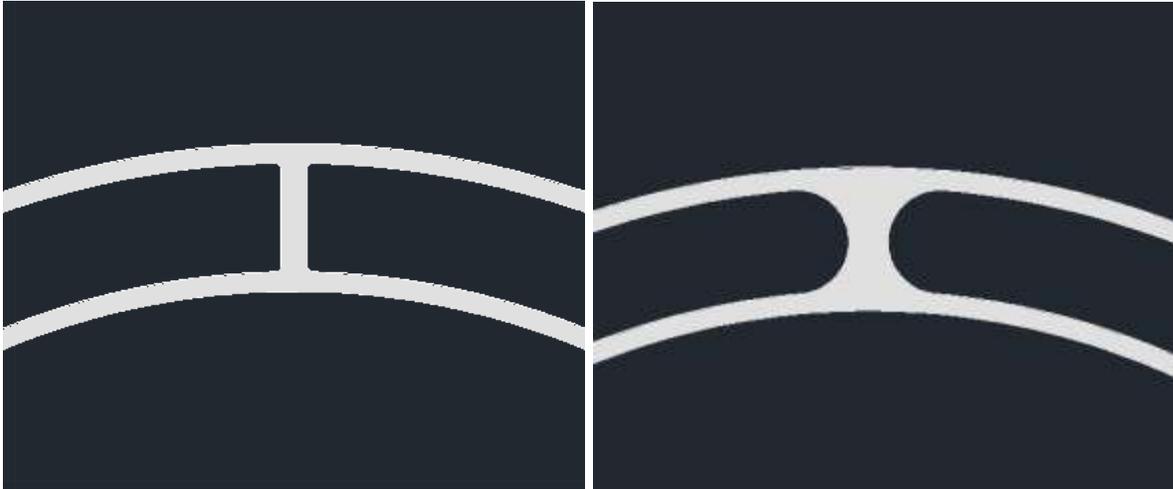
Modelo A: Este fue el primer modelo diseñado e impreso en 3D para pruebas de instalación, este modelo es el mostrado anteriormente (Fig. 10) su diseño fue pensando en la funcionalidad y fue planeado para ejercer de soporte a 3 capas de fibra polimérica, pero debido a que las medidas permitían una reducción en las separaciones permitiendo la adición de 1 capa extra y esto se reflejaba en un aumento de área superficial para la formación de biopelícula sin sacrificar mucha área de flujo, se procedió a su modificación. Inicialmente se pretendía usar un tubo de 1" cédula 80 para que fungiera como soporte central del interno, pero debido a otra modificación este se sustituyó por un tubo de PVC de  $\frac{3}{4}$ " cédula 40 esto con el fin de aumentar el espacio utilizable y poder añadir otra capa de fibra que rodease el tubo central.

Modelo B: Este segundo modelo está diseñado para permitir 5 capas de fibra concéntricas al tubo central de soporte, como se puede observar en el esquema (Fig. 12). Un detalle importante en el diseño del modelo B, es la modificación hecha para permitir una mayor resistencia mecánica a la presión permitiendo que los internos no se deformen esto se puede apreciar en la Fig. 15.





Desarrollo



*Fig. 15: Comparación de los detalles de las piezas diseñadas para el prototipo. A la izquierda el modelo A. A la derecha el modelo B. Elaboración propia.*

Para los extremos de los soportes de fibra polimérica se diseñaron “protectores” que se colocarán a los extremos del interno al ser instalado en el reactor, ayudaran a que los internos se vean más estéticos además de que fungirán como soportes para evitar un desplazamiento transversal debido a que es necesario que las fibras estén fijas al interior del tubo esto debido a que el movimiento provocaría que los esfuerzos mecánicos desprendan la biopelícula, algo que afecta al proceso y que se desea evitar.

Los dibujos en 2D realizados en AutoCAD de estos protectores se muestran en la Fig. 16 como puede apreciarse estos dibujos presentan 4 círculos de un diámetro pequeño equidistantes, estos son para el momento de realizar el modelo 3D.





*Fig. 16: Diseño 2D de las tapas que irán al inicio y final de los internos del RBT. Diseñado en AutoCAD. Elaboración propia.*

El modelo 3D se muestra en la Fig. 17 como se aprecia, 4 cilindros sobresalen de la estructura de la pieza esto servirán para detener a los internos de fibra polimérica dentro de los tubos del reactor una vez colocadas las reducciones y conexiones de los tubos del RBT.



*Fig. 17: Diseño 3D de las tapas de los internos del RBT. Elaboración propia.*





## **Diseño del modelo 3D en AutoCAD del Reactor biológico tubular**

Para ayuda del proyecto y con fines de visualización del ensamblado final y presentación del reactor biológico tubular se realizó un modelo 3D en AutoCAD de un módulo completo montado a un Skid, se espera que este modelo ayude en la construcción en el proyecto apoyando con una mejor visualización espacial de los componentes. La realización de este modelo puede verse como la culminación del uso más a fondo de las herramientas que ofrece el software Auto CAD ya que implica diversas herramientas de dibujo, medidas y modelados 3D.

Este modelo es una presentación formal de lo que se espera a futuro con ayuda del prototipo diseñado. En la Fig. 18 se puede ver el modelo 3D del reactor biológico tubular este contará con 8 módulos de tratamiento alimentados por una bomba de 1 hp y un compresor que suministrarán el agua a tratar y el aire necesario respectivamente. En el interior de cada módulo se localizará el interno construido como resultado del desarrollo del prototipo de esta tesis.

En el Anexo A se pueden encontrar diversas vistas isométricas, frontales y traseras del modelo 3D del reactor.





Fig. 18: Modelo del reactor biológico tubular elaborado en AutoCAD. Elaboración propia.

## **Etapa II: Construcción del prototipo de interno del RBT**

### **Impresión 3D de modelos y pruebas de montaje**

Para proceder con la construcción del prototipo era necesario la impresión de las piezas diseñadas previamente, las primeras piezas que se imprimieron fueron las pertenecientes al soporte del difusor, estas piezas fueron impresas en el material ABS (Acrilonitrilo-butadieno-estireno), se seleccionó este material por ser resistente al esfuerzo mecánico que deberá soportar por el flujo de agua del reactor y como un acercamiento a los materiales de impresión. Una vez impresas las piezas se realizaron pruebas de montaje de estas en el módulo, las pruebas fueron sencillas y satisfactorias debido a que estas piezas se diseñaron para fácilmente colocarse en el difusor de burbuja fina y posteriormente introducirse en el RBT. Mostrando que cumplían con su fin de centrar el difusor de aire y convertirlo en un interno capaz de ser colocado y retirado con relativa facilidad y de excelente manera.





Después del proceso de diseño el resultado final se muestra a continuación en la Fig. 19 Cabe destacar que el diseño de los soportes del difusor fueron los primeros en realizarse cuando apenas se estaba familiarizando con el programa AutoCAD más adelante se hará un análisis del resultado final.



*Fig. 19: A la izquierda: Soporte anterior del difusor de aire. Al centro: Difusor con ambas piezas impresas en 3D. A la derecha: Soporte posterior del difusor de aire.*

El montaje del interno de aireación dentro del tubo inicial del reactor se hizo satisfactoriamente mostrando que las medidas tomadas fueron las ideales, algo importante es que las piezas permiten que el difusor permanezca en el centro del tubo de 6" sin fijarlo para que si posteriormente se requiere hacer un cambio del difusor por algún problema en la membrana este cambio pueda realizarse fácilmente.

Las impresiones posteriores de los internos que fungirán de soportes para la fibra polimérica ya no se materializaron con ABS debido a que se encontraron beneficios del uso del PLA (ácido poli láctico) para la fabricación de las piezas esto tomando en cuenta que todas las piezas son para la construcción de un prototipo, el uso de





PLA ayuda debido a ser un material biodegradable y que tiene una resistencia mecánica muy parecida al ABS.

### **Acomodo interno del material polimérico de soporte para la biopelícula.**

Como se mencionó antes el acomodo interno final se estableció como 5 capas concéntricas de diferentes diámetros y con la misma separación entre ellas sin embargo inicialmente solo iban a ser 3 capas de fibra debido a que se consideró un tubo central de 1" y el diseño consideraba que la pieza impresa en 3D estuviera en contacto con el tubo de 6", posteriormente se usó un tubo de  $\frac{3}{4}$ " y la última pieza se diseñó para permitir una capa de fibra polimérica en contacto con el tubo de 6" lo que permitió el interno final de 5 capas.

Para la construcción del prototipo, primero se utilizó un tubo de PVC cédula 40 que fungiera como soporte central y para dar rigidez, sobre la superficie de ese tubo le fue puesta fibra polimérica, con esto el tubo central puede ser aprovechado mejor al menos en su cara exterior y permite que sea parte del tratamiento. Posteriormente las piezas diseñadas se colocaron equidistantes a lo largo del tubo central, una vez colocados los soportes, una nueva capa de fibra fue puesta sobre estos con la finalidad de formar un cilindro y fue prensado por el siguiente interno los que llevó a un problema a resolver y es la unión de las fibras para que adquirieran su forma cilíndrica, este problema se puede apreciar en la Fig.20 donde los soportes sí prensan a la fibra sin embargo esta no conserva su forma, otro detalle a tomar en cuenta que no se aprecia en la figura es el desplazamiento interno de los soportes estos al estar prensando la fibra son susceptibles a los movimientos y debido al





Desarrollo  
acomodo por capas una vez que uno de estos soportes se desplaza de su posición es necesario desarmar el prototipo hasta llegar a la capa que sufrió el desplazamiento. Para resolver este problema se realizó una investigación sobre algún pegamento que uniera la fibra de la manera que se requería.



*Fig. 20: Acomodo preliminar de la fibra polimérica usando los diseños realizados para los soportes.*

### **Unión del material polimérico no tejido.**

Era necesario realizar las uniones de la fibra para obtener las capas concéntricas requeridas y además se necesitaba que los soportes impresos se mantuvieran lo más fijo posible es por ello que para hacer las uniones se realizó una búsqueda de una variedad de pegamentos que pudieran unir las fibras de poliéster, de los que se encontró se eligieron 3 por accesibilidad para realizar en primera instancia pruebas de pegado y secado para elegir el pegamento con mayor facilidad de aplicación y que beneficie al proceso de armado.





Desarrollo

Los pegamentos probados fueron Resistol 5000 y pegamento para PVC de dos diferentes marcas Siler y Omega Pitbull, las uniones de fibra y su apariencia se puede ver en la Fig. 21. Todos los pegamentos probados mostraron lograr una gran adhesión de la fibra pero tuvieron algunas diferencias a partir de las cuales se eligió el pegamento a usar para la unión de la fibra en el prototipo, por ejemplo entre las marcas de pegamento para PVC la marca Siler tiene un tiempo de secado preliminar menor, en cuanto al aspecto que se obtiene al usar Resistol 5000 por el color propio del pegamento fue un motivo para desestimararlo debido a que el prototipo busca asemejar lo más posible al modelo comercial y es importante la apariencia del producto terminado.



*Fig. 21: Pegado de la fibra polimérica. A: pegado con Resistol 5000. B: Pegado con pegamento para PVC marca Siler. C: Pegado con pegamento dorado para PVC marca Omega Pitbull.*





## **Armado y pegado del prototipo A**

Una vez elegida la manera de unir la fibra polimérica y evitar que los internos diseñados se desplazaran se procedió a un nuevo armado del prototipo esta vez más en forma, los procedimientos descritos aquí se pueden observar en el Anexo B. Primeramente en el tubo principal se adhirió en su totalidad fibra polimérica para posteriormente colocársele las primeras piezas internas tanto la fibra como las piezas estas se pegaron usando pegamento para PVC marca Siler. La distancia entre las piezas impresas se definió tomando en cuenta la deformación de la fibra ya que entre más separadas estuvieran, la fibra era más difícil de unir con el pegamento por otro lado y entre más juntas las piezas el gasto en material de los prototipos y en general de los internos sería más alto además de perderse más área de fibra para tratamiento. Una vez definida la separación entre piezas se pegaron al tubo central con fibra y se le colocó otra capa, la cual se unió de igual manera con pegamento para PVC en los bordes de las piezas internas, esto va dando como resultado la formación de un cilindro de fibra, sobre este cilindro se colocan las siguientes piezas internas colocándose en la misma posición que las piezas inferiores y prensando la fibra, de igual manera se pegan para así evitar su movimiento con el paso del flujo de agua o por movimientos al manipular el prototipo, nuevamente se pueden apreciar los nuevos internos y se repiten los pasos colocando la nueva capa de material polimérico formando un nuevo cilindro de mayor diámetro, al concluir el armado las regiones del paso del agua, parecía que tenían la forma adecuada. En la Fig. 22 se puede apreciar la apariencia final del interno. Se aprecia la separación para el paso del agua, así como la fibra





Desarrollo intercalada, como se aprecia en la imagen el tubo central de  $\frac{3}{4}$ " de PVC permitiría el paso de agua a través de este por lo que sería necesario bloquear ese paso debido a que no tiene función más que estructural y de soporte.



*Fig. 22: Modelo "A" del prototipo de interno terminado.*

Una oportunidad de mejora que se observó una vez armado el prototipo A fue que se podía aprovechar mejor la capa que estaba en contacto directo con el tubo del reactor biológico tubular, como se mostró (Fig. 22), no hay fibra que este en contacto con la pared del tubo del reactor. Reduciendo el tamaño de los internos es posible que pueda introducirse una capa polimérica que al final ayudaría a incrementar el área de contacto y aprovechar mejor el volumen del reactor, la razón inicial de que no se optara por esto desde un principio fue el de mantener el paso de agua a un centímetro, pero considerando los beneficios era mejor reducir el paso de agua y añadir una última capa que contaría con la mayor área de contacto.





Desarrollo

Debido a lo anterior y solo con fines de prueba se añadió una capa más sin hacer la reducción de las piezas con las que se contaba y esto se puede apreciar en la Fig. 23 sin embargo las dimensiones con las que fueron diseñadas las piezas del modelo A no contemplaban una última capa ya que se siguió el modelo previo y se cuidó la correcta separación entre capas, por lo que el prototipo terminado que se aprecia no puede ser introducido al interior de los tubos de 6" del RBT.



*Fig. 23: Modelo "A" con una capa de fibra polimérica añadida al final.*

### **Armado y pegado del prototipo B**

El prototipo B, se armó aplicando el mismo procedimiento que en el prototipo A.

La principal diferencia entre los prototipos radica en el diámetro de las piezas que en este caso son menores y esto se ve reflejado en las capas de fibra polimérica, ya que permite la anexión de más y que el prototipo pueda entrar perfectamente en los tubos que conforman el reactor.





Desarrollo

Otra diferencia en los prototipos se mostró en los diseños de la Fig.15 esto en cuanto estructura de las piezas, esta diferencia principalmente ayuda al soporte mecánico de los internos una vez impresas las piezas se puede corroborar que esta modificación le da mayor resistencia a la deformación por presión al manipularlas inicialmente no se había contemplado ya que el diseño se centraba en dar la separación correcta para el flujo de agua.

El nuevo prototipo se observa en la Fig. 24 además de que se puede apreciar los pasos de armado en el Anexo C.



*Fig. 24: Modelo "B" del prototipo de interno terminado.*

En el nuevo prototipo se aprecia más el tubo central del interno y las piezas impresas debido al color de impresión.





### **Etapa III: construcción de la estructura del Reactor Biológico Tubular y pruebas de montaje de los módulos de aireación y de reacción.**

#### **Ensamblado de la estructura del reactor biológico tubular.**

El prototipo de modulo diseñado y construido en esta tesis debe estar enfocado en su uso en el reactor biológico tubular por lo que para lograr su finalidad es necesario probarlo en la estructura del reactor. Se armó la estructura principal del reactor con el uso de diversos materiales como son: perfiles unicanal de 4", soleras de acero inoxidable, tuercas, tuercas con resorte, tornillos, abrazaderas en U y escuadras para sostener la estructura. En la Fig. 25 se aprecia la estructura principal del reactor que consta de 8 tubos de 6" que con el desarrollo de esta tesis serían ocupados por un módulo interno final concebido en base al prototipo armado.



*Fig. 25: Estructura principal del Reactor Biológico Tubular RBT.*





Resultados, análisis y discusión.

El reactor se dejó en ese nivel de avance en su construcción debido a que es necesario una vez aprobado el prototipo, fabricar en mayor cantidad e introducir los internos en todo lo largo de los tubos de 6”.

Una vez armado este prototipo se tomó para proceder y realizar las pruebas de montaje en la estructura del reactor biológico tubular.

## **Resultados, análisis y discusión.**

### **Etapa I**

De la etapa 1 se puede decir que los diseños realizados fueron mejorando considerablemente con el desarrollo de las diferentes piezas, se puede mencionar el diseño mostrado en la Fig.8, en la cual los grosores manejados no eran los requeridos si no que se encontraban en exceso, esto debido a que aún no se conocía la resistencia que podía llegar a tener los materiales usados en impresión 3D, teniendo en cuenta la resistencia que presenta tanto el material ABS como el presentado por el PLA, podrían rediseñarse estos modelos permitiendo un mejor flujo de agua y utilizando una menor cantidad de material y energía para su fabricación lo que se reflejaría en una disminución de costos, estas piezas iniciales ocuparon 176 gramos de material ABS con un costo comercial aproximado de 69 pesos.

En cuanto al diseño de las piezas que prensarían a la fibra para mantenerla en la conformación deseada se considera que el grosor es el apropiado para soportar la





Resultados, análisis y discusión.  
presión y además se refuerza con las modificaciones mostradas en la Fig. 15. El grosor de estas piezas es 6 veces y medio más delgadas a las que se realizaron previamente para soporte del difusor, la cantidad de material de fabricación para construir el interno mostrado en este trabajo es de 258 gramos de PLA lo que equivaldría a 153 pesos de un filamento comercial.

En cuanto al diseño de la Fig. 10, se mencionó que el círculo central de la pieza más pequeña es para que pueda montarse un tubo de 1" que funcionará de soporte de todo el prototipo sin embargo se usó un tubo de  $\frac{3}{4}$ " cédula 40 para añadir una nueva capa de fibra, esto se realizó probando otros tubos diferentes ya que se tenía impresa la pieza y era más sencillo cambiar el tubo que diseñar y esperar a imprimir una nueva.

La abertura de los pasos de agua se diseñó a partir de estudios previos donde se evaluó el coeficiente de transferencia de oxígeno  $k_{La}$  mostrando que al aumentar el flujo el coeficiente aumenta, esto debido a la reducción de la capa límite; sin embargo, al aumentar la velocidad por encima de 0.095 m/s no se observó un aumento considerable del coeficiente (1.02 a 1.09  $\text{min}^{-1}$ ). Por lo cual se puede concluir que un aumento por arriba de este valor no favorecerá la transferencia de oxígeno en el sistema (García González, 2019).

Para determinar el paso de agua de las piezas a diseñar se inició por realizar un balance de materia del proceso anterior.

Para la determinación de flujos se tienen las siguientes relaciones del proceso obtenidas del diagrama de flujo de proceso (Fig. 3).





$$F_2 = F_3 = F_5 \quad Ec. 2$$

$$F_1 = F_7 \quad Ec. 3$$

$$F_5 = F_7 + F_6 \quad Ec. 4$$

De la operación se conoce  $F_3$  y  $F_7$  que son el flujo de entrada y el flujo de agua tratada, con 4 ecuaciones y 4 incógnitas es posible determinar todas las corrientes restantes.

La relación de recirculación está dada por la siguiente ecuación.

$$\% \text{ de recirculación} = \frac{F_6}{F_5} \cdot 100 \quad Ec. 5$$

A partir del balance de materia presentado en la tabla 2 se determina la cantidad de agua que ingresa al módulo de reacción tubular, este balance es a partir de datos previos de operación del reactor, debido a que los datos de operación variaban día con día se tomaron los datos del día 66 del proceso.

De la tabla 2 se destaca que el proceso que se llevaba a cabo se utiliza un tubo Venturi que suministraba el oxígeno disuelto antes de ingresar al reactor. La recirculación en el proceso es de 91.2%.





Resultados, análisis y discusión.

Tabla 2: Balance de materia del modelo previo del reactor biológico tubular (López, 2020).

Corriente	1	2	3	4	5	6	7
Descripción	Ingreso a tanque de alimentación	Ingreso a bomba de alimentación	Ingreso a RBT	Lodos de purga	Salida del RBT	Recirculación a tanque	Salida de agua tratada
Tipo	Continuo	Continuo	Continuo	Intermitente (día)	Continuo	Continuo	Continuo
Fase	Líquida	Líquida	Líquida	Líquida / Sólida	Líquida	Líquida	Líquida
Caudal (m <sup>3</sup> /h)	0.29	3.6	3.6	0.25	3.6	3.31	0.29
DQO (g DQO/m <sup>3</sup> )	212.53	212.53	212.53		36.23	36.23	36.23
NH <sub>4</sub> (g/m <sup>3</sup> )	8.4	8.4	8.4		2	2	2
Oxígeno disuelto (g/m <sup>3</sup> )	0	1.68	1.68		4.26	4.26	4.26
SST (mg SST/L)	570	570	570		80	80	80
Lodos (kg)				4.5			

A partir de estos datos se puede analizar el tipo de flujo en un tubo de 6" cédula 80 como el que se usará en el RBT, se determina calculando el número de Reynolds y usando una correlación entre el agua y el agua residual.

El número de Reynolds se calculó usando la siguiente ecuación.

$$Re_a = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad Ec. 6$$

Donde:

- $Re_a$  Es el número de Reynolds del agua.
- $\rho$  Es la densidad del agua a 20° (kg/m<sup>3</sup>)
- $v$  Es la velocidad del agua en el sistema (m/s)
- $D$  Es el diámetro de la tubería (m)





Resultados, análisis y discusión.

Se obtiene un número de Reynolds de 8645.9 ahora con la siguiente relación (2)

(Xu et al., 2014), se calcula el Reynolds para un agua residual.

$$\frac{Re_r^{0.27}}{Re_a^{0.25}} = 1.0139 \quad Ec. 7$$

Donde:

- $Re_a$  Es el número de Reynolds del agua.
- $Re_r$  Es el número de Reynolds del agua residual.

El número de Reynolds del agua residual calculado es 4649.4 lo que indica que el tipo de flujo es turbulento y se puede considerar que no hay perfiles de velocidad de flujo en la tubería.

Tomando el flujo de 86.4 m<sup>3</sup>/d que es el que ingresa al RBT y con una abertura de 1 cm entre los internos se obtendría un área de 97.97 cm<sup>2</sup> para el paso del fluido, esta área está distribuida en las 4 piezas diseñadas, la velocidad de flujo calculada sería de 0.102 m/s asegurando funcionamiento en la difusión de oxígeno y por ende en el crecimiento microbiano y la degradación de materia orgánica.

Tomando en cuenta las modificaciones hechas que redujeron la abertura del paso de agua, pero aumentaron considerablemente el área del soporte polimérico, con el flujo antes planteado y la nueva área de 84.63 cm<sup>2</sup> se obtiene una velocidad de flujo de 0.118 m/s en cada pieza, esta velocidad es mayor a la recomendada. Más adelante se espera operar experimentalmente el reactor y obtener datos de funcionamiento.





#### Resultados, análisis y discusión.

En caso de que las modificaciones realizadas al prototipo en cuanto a la abertura del paso del agua residual en el reactor, que se redujo, afectarán de tal manera que ocasionara problemas al momento de la prueba de operación, una recomendación es la reducción del tubo central de soporte o incluso su sustitución por una varilla plástica que solo soporte el prototipo y el espacio liberado sea distribuido en el diseño de las piezas según convenga.

Las pruebas de montaje una vez teniendo el modelo A construido en la etapa III sirvieron para que pudiera mejorar el prototipo en cuanto a diseño, incluyendo más área superficial de la fibra reduciendo en AutoCAD las piezas. El tener en físico el prototipo desarrollado permite ampliar el panorama para realizar mejoras *a priori* como las realizadas en este trabajo. Una de las cosas que se pudo observar y que convino mejorar es la deformación de las piezas al realizarles presión, como anteriormente se mencionó, esta deformación se da al ser manipuladas lo que podría llevar a que estas piezas sufrieran rupturas por ello se realizó el diseño que se aprecia en la Fig. 15 con estos empalmes la pieza ya no presentaba las mismas deformaciones al manipularse, esto es importante debido a que el diseño de estos anillos en parte se pensó para que prensaran la fibra, por ello al colocarse se necesita la aplicación de fuerza.

Los diseños de los protectores mostrados en la Fig. 16 y 17, no se imprimieron debido a que no eran necesarias, una vez aprobado el prototipo se construirá con una longitud de 2 metros y se usarán estos protectores en los extremos.





Resultados, análisis y discusión.

En diseño hecho del reactor biológico tubular en la etapa I se aplicaron la mayoría de las herramientas que se usaron en los dibujos digitales y en la modelación 3D de AutoCAD, se aprecia la adaptación a las modificaciones y desarrollos de esta tesis al agregarse el soplador que suministrará aire para el difusor de burbuja fina.

## **Etapa II**

La etapa de la construcción del prototipo tiene varias cosas a resaltar, primero, sobre los materiales de impresión los cuales fueron ABS y PLA ambos presentan características mecánicas similares siendo un poco más resistente el ABS en cuanto a fuerza de tensión y fuerza de impacto según reportan (Lay et al., 2019). El PLA es biodegradable lo que le da una ventaja en cuanto al impacto ambiental que representa nuestro sistema, un problema que esto daría sería que al estar en contacto constante con microorganismos el PLA se empieza a degradar sin embargo estudios demuestran que la biodegradabilidad del PLA no es tan rápida tomando incluso años para lograr degradarse (Jeong Jeon & Kim, 2013), el material para crear el modelo final aún no está definido pero conocer y estar en contacto con los materiales fue de ayuda en esta tesis y lo será para el futuro del reactor biológico tubular.

Una vez teniendo el primer prototipo construido mostrado en la Fig. 20, hay varias cosas a analizar, primeramente, si la fibra adquiere la forma cilíndrica, y se aprecia que no, lo cual se resolvió con el empleo del pegamento para PVC. La separación para el paso del agua es la adecuada con las estimaciones tomadas, una vez modificado el prototipo "A" cabe analizar la Fig. 12 porque sacrificando un poco el





Resultados, análisis y discusión.  
paso del agua se consigue aumentar el área de soporte. Los esfuerzos cortantes serán mayores, esto podría ocasionar algún problema sin embargo la alta porosidad de la fibra permite proteger a la biopelícula de estos esfuerzos.

Como se mencionó el área total de los pasos de agua del prototipo final desarrollado es de  $84.63 \text{ cm}^2$  mientras que la velocidad del flujo esperada es de  $708.9 \text{ cm/min}$  tomando en cuenta un flujo homogéneo en todo el reactor, este flujo funciona en este reactor porque la porosidad protege la biopelícula. En otro tipo de soportes a altas velocidades de flujo y por ende altos esfuerzos cortantes, la producción celular de polisacáridos extracelulares disminuye y estos son los responsables de la adherencia a superficies (Park et al., 2011).

La biopelícula es la parte importante en el proceso por eso es conveniente pensar en el resultado del prototipo en términos del soporte donde se formará esta.

El área aparente de la fibra que estará en contacto con el agua con oxígeno disuelto que se usó en el prototipo construido es de  $9598.6 \text{ cm}^2$  o bien  $0.96 \text{ m}^2$  si se extrapola este dato a todo el reactor biológico tubular como el presentado en el modelo 3D, se tendría un área aparente de  $333\ 863 \text{ cm}^2$  o bien  $33.39 \text{ m}^2$  ahora considerando que la porosidad de la fibra es de alrededor de 96%, se puede afirmar que el acomodo de la fibra dará una amplia área en un volumen pequeño, estudios en este material muestran un crecimiento  $1.4 \text{ g}$  de biomasa por gramo de soporte (García González, 2019) y esto es muy conveniente en términos de espacio.





#### Resultados, análisis y discusión.

Considerando a la fibra con un grosor de 3.5 mm se tendría un volumen de fibra en el reactor de 11.68 m<sup>3</sup> esto es importante porque la característica porosa de la fibra es la que funciona tanto para aumento del área superficial como a la protección de la biopelícula para evitar desprendimientos por la fuerza cortante del flujo ya que se sabe que las fuerzas cortantes juegan un papel importante en la formación de biopelículas (Park et al., 2011).

Se ha observado la relación entre las fuerzas cortantes y los sólidos suspendidos totales, estos aumentan conforme aumentan los esfuerzos cortantes por la velocidad sin embargo para el caso de la fibra no tejida aumentando la velocidad hasta 0.112 m/s con 129.4 Pa de esfuerzos cortantes la diferencia de SST es mínima comparada con operaciones a menor velocidad y por ende menores esfuerzos cortantes (García González, 2019), Esto confirma que la fibra usada en el prototipo protege la biopelícula formada permitiendo mayores flujos y asegurando la correcta difusión de oxígeno.

En la Fig. 26 se puede apreciar teóricamente como la configuración de la fibra proveerá una extensa área para la biopelícula si se consideran las características descritas de la fibra en el acomodo desarrollado.



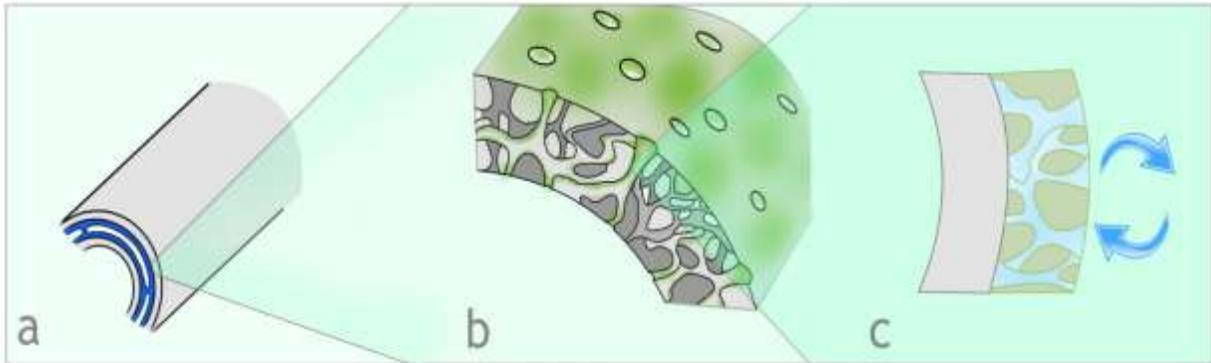


Fig. 26: a: Configuración de la fibra desarrollada en esta tesis. b: Porosidad de la fibra polimérica y desarrollo de la biopelícula. c: Micro conductos de agua en la biopelícula. Elaboración propia.

Es importante destacar que la difusión de oxígeno y materia orgánica juegan un papel importante en el reactor, el prototipo está pensado para que la distribución de agua con oxígeno disuelto tenga la mejor oportunidad de fomentar el crecimiento microbiano y el consumo de la materia orgánica presente.

El crecimiento microbiano, la degradación de materia orgánica y el uso de oxígeno están estrechamente relacionados con la biopelícula, en la siguiente ecuación se aprecia esta relación.

$$r_{O_2} = r_o + \gamma \cdot r_g \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

- $r_{O_2}$  es la velocidad de uso de oxígeno ( $\text{g/m}^3\text{d}$ )
- $r_o$  es la velocidad de remoción de materia orgánica ( $\text{g/m}^3\text{d}$ )
- $\gamma$  es el radio de DBO removida por masa celular producida ( $\text{g/g}$ )
- $r_g$  es la velocidad de producción de nueva masa microbiana ( $\text{g/m}^3\text{d}$ )





La velocidad de crecimiento  $r_g$  se expresa con el modelo de Monod con la siguiente ecuación.

$$r_g = \mu_m \frac{C}{K + C} X \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

- $r_g$  es la velocidad de producción de nueva masa microbiana ( $\text{g}/\text{m}^3\text{d}$ )
- $\mu_m$  es la velocidad máxima específica de crecimiento de biomasa ( $\text{d}^{-1}$ )
- $C$  es la concentración de materia orgánica ( $\text{g}/\text{m}^3$ )
- $K$  es el coeficiente de saturación ( $\text{g DBO}/\text{m}^3$ )

En la Fig. 27 se puede observar las variaciones con el tiempo de estos parámetros, además se observa la característica curva de Monod de desarrollo microbiano.

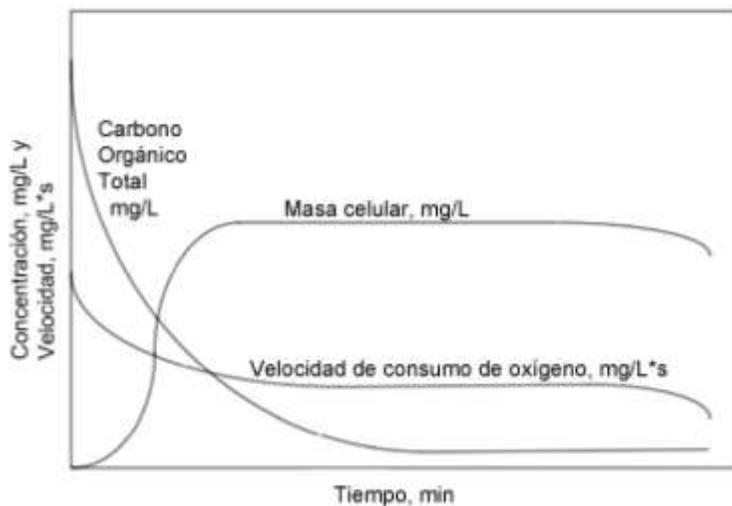


Fig. 27: relación entre materia orgánica removida, producción de masa celular y velocidad de consumo de oxígeno (Water Environment Federation, 2011).





Resultados, análisis y discusión.

El desarrollo como se observa en la Fig. 28 llega a un estado estacionario donde se produce nueva masa a la misma velocidad que esta muere, esto no contempla algunos aspectos de la biopelícula que tienen que ver con el desprendimiento.

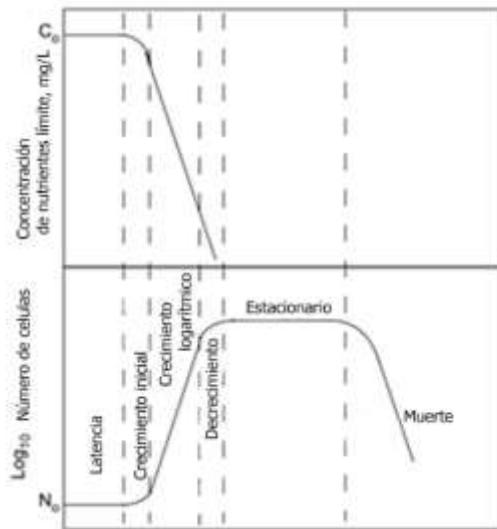


Fig. 28: relación entre materia orgánica consumida y el crecimiento celular (Water Environment Federation, 2011)

El desprendimiento de la biomasa en sistemas de biopelícula es importante de analizar en la etapa II de construcción, se mostró en la Fig. 26 que la biomasa se adherirá a todo el polímero del prototipo construido, se debe mencionar que los efectos cortantes causan diferentes fenómenos como son: erosión, esto es que se separan pequeñas partículas de la superficie. Desprendimiento, se refiere a grandes cantidades de biopelícula y esto sucede cuando el grosor de la biopelícula es tal que no se puede nutrir la base y esta se desprende. Abrasión, esta ocurre por la colisión de partículas suspendidas en reactores de lecho móvil o fluidizado. Depredación que es cuando microorganismos como protozoarios consumen parte de la biopelícula y la desprenden (Choi & Morgenroth, 2003).





Resultados, análisis y discusión.

Como se mencionó los SST no aumentan tan significativamente al aumentar los esfuerzos cortantes por lo que el prototipo construido con la fibra protegerá la biopelícula de excesos de erosión, mientras que, aunque no se ha medido como tal el grosor de biopelícula por el nivel de remoción y la generación de SST es probable que no se presente el fenómeno de desprendimiento de biopelícula.

Para evitar el taponamiento del reactor por la acumulación de microorganismos el RBT piloto se purgaba semanalmente por lo que con los internos desarrollados se recomienda realizar la purga de igual manera.

En la operación del reactor se tenía una concentración de 250 mg SST/cm<sup>2</sup> y se estimó al interior un total de 392 g de SST adheridos al soporte (García & Durán, 2017).

Se puede calcular a través de la carga orgánica que se producirían 4.5 kg de lodos al día con los datos en el balance de materia, esta cantidad se determina teóricamente con la siguiente ecuación (López Vázquez et al, 2017).

$$\frac{FX_T}{FS_{ti}} = \frac{1}{f_i} \left[ \frac{(1 - f_{s'us} - f_{s'up})Y_{HV}}{(1 + b_H TRS)} (1 + f_H b_H TRS) + \frac{f_{s'up}}{f_{cv}} \right] \quad Ec. 10$$

Donde:

- $\frac{FX_T}{FS_{ti}}$  son los lodos producidos al día por mg de DQO  $\left[ \frac{mgSST}{mgDQO} \right]$
- $f_i$  es la fracción de sólidos suspendidos volátiles (SSV/SST)
- $f_{s'us}$  es la fracción no biodegradable y soluble
- $f_{s'up}$  es la fracción no biodegradable y particulada
- $Y_{HV}$  es el rendimiento (mg SSV/mg DQO)
- $b_H$  es la tasa de respiración endógena (d<sup>-1</sup>)





- *TRS* es el tiempo de retención de sólidos (d)

### **Etapa III**

En la construcción de la estructura del RBT, aun se deben de colocar los internos finales en cada uno de los tubos, un aspecto importante a destacar son sus dimensiones que la hacen ser un dispositivo tipo planta paquete capaz de ser comercializada en casi cualquier industria o comunidad por su facilidad de instalación, un aspecto de igual manera importante es el peso si bien los tubos de PVC cédula 80 son pesados es recomendable su uso para soportar la presión que se generará, al ser fijada la estructura al piso el peso del RBT no será problema en ningún ámbito.

En las pruebas de montaje se puede destacar primero que los diseños para el difusor de burbuja fina fueron adecuados y milimétricos como se observa en la Fig. 29, la pieza completa de los soportes y el difusor de aire pueden ser introducidos sin problema y ser retirados igualmente en caso de que se deba cambiar la membrana de difusión de aire.





## Resultados, análisis y discusión.



*Fig. 29: Prototipo del módulo de aireación al interior del Reactor Biológico Tubular.*

En cuanto a las pruebas de montaje del prototipo A se puede observar en la Fig. 30 que el prototipo entra en el tubo del RBT, se destaca la ausencia de fibra en la última pieza impresa, esto como se mencionó era para dejar la correcta separación para el flujo.



*Fig. 30: Prototipo "A" al interior del Reactor Biológico Tubular.*

El prototipo final se probó de igual manera en la estructura del reactor biológico tubular este prototipo ya cuenta con una fibra en la última pieza impresa y como se





Resultados, análisis y discusión.  
observa en la Fig. 31 se puede introducir igualmente en el reactor biológico tubular, esta característica se debe resaltar si se piensa en estos internos como productos consumibles, semejantes a los cartuchos de tinta de una impresora, por ello es necesario que tengan facilidad de colocación y extracción, aun no se conoce el tiempo de vida del producto pero el modelo anterior de RBT estuvo operando durante 3 meses sin que se le cambiase el soporte interno ni presentara ningún problema de operación.



*Fig. 31: Prueba de montaje del prototipo construido con las piezas del modelo "B".*

El cartucho del RBT es el siguiente paso una vez siendo aprobado este prototipo en la Fig. 32 se esquematiza cómo se puede cambiar el interno del reactor solo quitando una parte de este sin desmontar todo, las flechas azules indican que puede ser colocado o extraído el interno según sea el caso, en este esquema se observa los diferentes módulos del RBT.



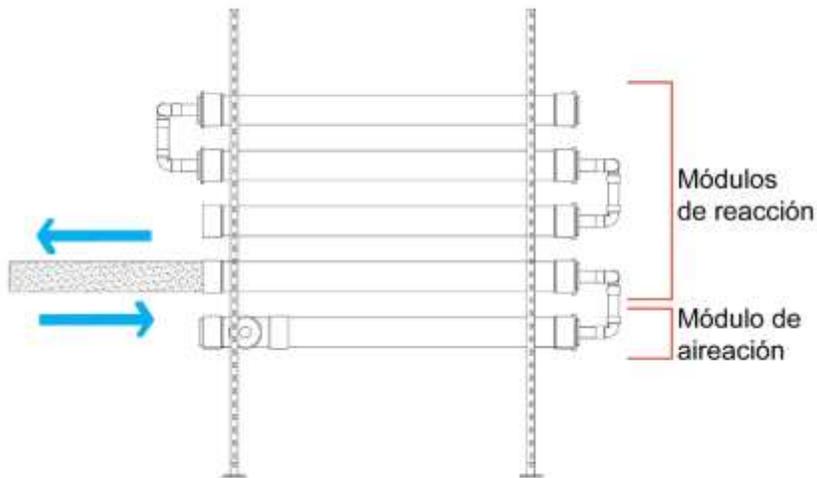


Fig. 32: Esquema representativo del reactor biológico tubular y el cambio de su fibra interna.

Un RBT sencillo ocupa 4 módulos internos de reacción de 2 metros y un módulo interno de aireación por lo que el siguiente paso es crear en masa las piezas desarrolladas para poder construir un reactor que sea probado en un caso de estudio con agua real y sea contrastado con el modelo RBT anterior.

Para mejorar el problema del oxígeno disuelto presentado en la operación anterior, se diseñó el nuevo proceso con un difusor de aire y las piezas impresas en este trabajo, el difusor será conectado a un soplador como se muestra en la Fig. 33 que corresponde a un diagrama de flujo de proceso propuesto para el correcto funcionamiento de los internos desarrollados.





### Resultados, análisis y discusión.

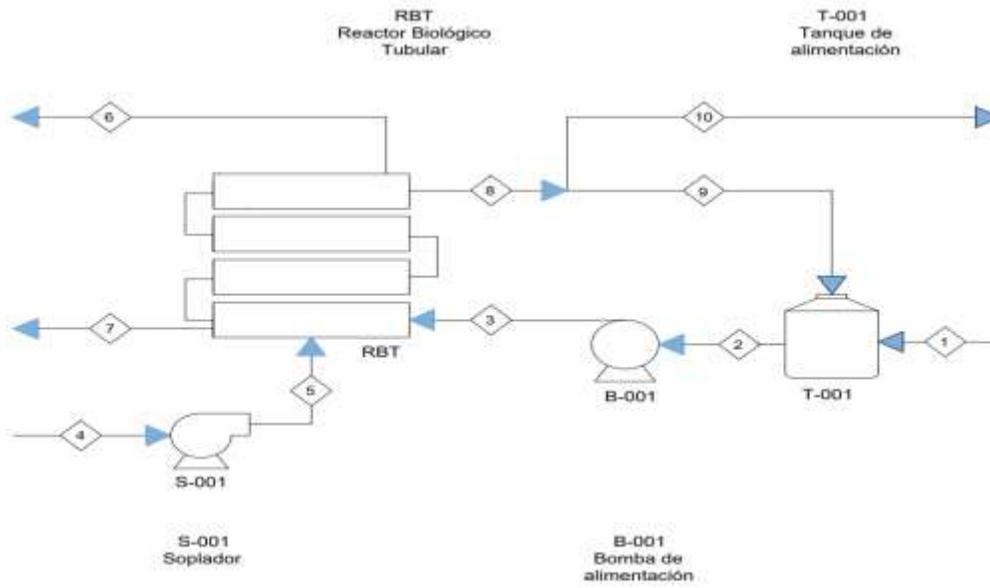


Fig. 33 Diagrama de flujo de proceso propuesto para el proceso según los internos desarrollados.





## Conclusiones

Con la elaboración del presente trabajo se pueden destacar las siguientes conclusiones.

- Se logró diseñar e integrar los cambios en el módulo de aireación y de reacción, mediante el aprovechamiento del programa AutoCAD, se aplicaron estos cambios al realizarse las impresiones físicas de los modelos diseñados obteniendo buenos resultados que sentaran la base para su instalación en forma.
- Las piezas internas impresas en 3D son ideales para el desarrollo del prototipo y pueden modificarse según la conveniencia futura del reactor.
- A través del modelo 3D del reactor con el programa AutoCAD se obtuvo una posible configuración y acomodo de los demás componentes que lo integran, se espera sea de gran ayuda el modelo tanto como presentación como para una guía de construcción.
- Se logró la construcción del prototipo de módulos de reacción biológica con diversas alternativas, analizándolas, aprovechando el manejo adquirido en el programa AutoCAD.
- El prototipo construido es útil y práctico para su instalación se recomienda hacer pruebas de funcionamiento antes de su producción como modelo comercial en el tratamiento de agua y su reúso.





## Bibliografía

1. Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155–162.
2. Ceja de la Cruz, Z. T. (2019). Tratamiento de aguas residuales. *Nota-INCyTU*, 28.
3. Chang, J., He, X., Bai, X., & Yuan, C. (2019). The impact of hydrodynamic shear force on adhesion morphology and biofilm conformation of *Bacillus sp.*. *Ocean Engineering*, 1-8.
4. Chen, Z., Wu, Q., Wu, G., & Hu, H. Y. (2017). Centralized water reuse system with multiple applications in urban areas: Lessons from China's experience. *Resources, Conservation and Recycling*, 117, 125–136.
5. Choi, Y. C. and Morgenroth, E., 2003. Monitoring biofilm detachment under dynamic changes in shear stress using laser-based particle size analysis and mass fractionation. *Water Science and Technology*, 47 (5), pp. 69-76.
6. Comisión Nacional del Agua. (2015). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Diciembre 2015*. México: SEMARNAT.
7. CONAGUA. (2011). *Estadísticas del agua en México, Capítulo 7 Escenarios futuros*. México: Semarnat.
8. De Anda Sánchez, J. (2017). Saneamiento Descentralizado y Reutilización Sustentable de las Aguas Residuales Municipales en México Decentralized Sanitation and Sustainable Reuse of Municipal Wastewater in Mexico. *Sociedad y Ambiente*, 5(14), 119–143.
9. Detand, J., Bastiaens, R., Grimonprez, B., & Rysman, O. (2010). The role of prototyping in product development. *Proceedings of the 4th International PMI Conference, January*, 8.
10. Fuentes, A. (2017). Evaluación de la nitrificación en un nuevo tipo de reactor tubular de biopelícula para el tratamiento de aguas residuales. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
11. García, S., & Durán, A. (2017). Biological tubular reactor, new technology for small wastewater treatment plants. Nantes Francia: International IWA conference on sustainable solutions for small water and wastewater treatment systems.
12. García, S. (2018). Estudio de un reactor biológico de biopelícula fija a escala laboratorio con el uso de materiales no tejidos para la fijación de la biomasa. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.
13. Hoyos, M., & Ivan, R. (2000). *Pequeñas Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales Domesticas ( Aplicacion En Paises Andinos ) Basadas En El Reactor Anaerobio a Piston Rap-100 ( Ch ). Experiencias a Escala Real*





Bibliografía

14. IDOM Consulting Engineering Architecture. (2018). *Desarrollo de rutas de instrumentación de las contribuciones nacionalmente determinadas en materia de*. Ciudad de México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
15. IWA, (. w. (2018). *The reuse opportunity*. In: *Wastewater report*. England.
16. Jeong Jeon, H., & Kim, M. (2013). Biodegradation of poly(L-lactide) (PLA) exposed to UV irradiation by mesophilic bacterium. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 289-293.
17. Langergraber, G., Pressl, A., Kretschmer, F., & Weissenbacher, N. (2018). Small wastewater treatment plants in Austria – Technologies, management and training of operators. *Ecological Engineering*, 120(March), 164–169.
18. Lay, M., Thajudin, N. L. N., Hamid, Z. A. A., Rusli, A., Abdullah, M. K., & Shuib, R. K. (2019). Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding. *Composites Part B: Engineering*, 176(July), 107341.
19. Liu, T., Quan, X., & Li, D. (2017). Evaluations of biofilm thickness and dissolved oxygen on single stage anammox process in an up-flow biological aerated filter. *Biochemical Engineering Journal*, 119, 20–26.
20. Lofrano, G., & Brown, J. (2010). Wastewater management through the ages: A history of mankind. *Science of the Total Environment*, 408(22), 5254–5264. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.062>
21. López, J. (2020). Simulación y modelación de un reactor biológico tubular para el tratamiento de aguas residuales, mediante la estimación de parámetros en aquasim. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
22. Martin , C., Alex , Y., Aleksandra , K.-Y., & Inga , B. (2001). Integrated product policy and eco-product development. *Greenleaf Publishing Ltd*, 98.
23. Massoud, M. A., Tarhini, A., & Nasr, J. A. (2009). Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. *Journal of Environmental Management*, 90(1), 652–659.
24. Mažeikienė, A. (2019). Improving small-scale wastewater treatment plant performance by using a filtering tertiary treatment unit. *Journal of Environmental Management*, 232(November 2018), 336–341.
25. Meena, R. A. A., Yukesh Kannah, R., Sindhu, J., Ragavi, J., Kumar, G., Gunasekaran, M., & Rajesh Banu, J. (2019). Trends and resource recovery in biological wastewater treatment system. *Bioresource Technology Reports*,
26. Mital, A., Desai, A., Subramanian, A., & Mital, A. (2014). The Structure of the Product Design Process. In *Product Development*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-799945-6.00003-x>
27. Molina Burgos, J. (2015). *Evaluación de la eliminación de materia orgánica y nitrógeno de las aguas residuales en un reactor biopelícula de membrana tubular aireada*. La Coruña: Universidad de la Coruña.





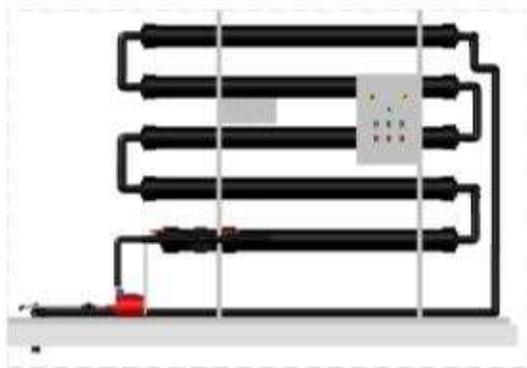
Bibliografía

28. Molinos Senante, M., Gómez, T., Caballero, R., Hernández, F., & Sala, R. (2015). Assessment of wastewater treatment alternatives for small communities: An analytic network process approach. *Science of The Total Environment*, 676-687.
29. Moussavi, G., Kazembeigi, F., & Farzadkia, M. (2010). Performance of a pilot scale up-flow septic tank for on-site decentralized treatment of residential wastewater. *Process Safety and Environmental Protection*, 88(1), 47–52.
30. Muñoz Reinoso, J. C. (1995). Influence of Phreatic Water Table on the Vegetation of Areas of Discharge on Sand in. *Limnetica*, 11(1975), 9–16.
31. OECD. (31 de Octubre de 2019). *Glossary of statistical terms*. Obtenido de <https://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=2086>
32. Park, A., Jeong, H. H., Lee, J., Kim, K. P., & Lee, C. S. (2011). Effect of shear stress on the formation of bacterial biofilm in a microfluidic channel. *Biochip Journal*,
33. Rayna, T., & Striukova, L. (2016). From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, 214–224.
34. Romero Zúñiga, L. E. (2001). Control de procesos. In *Ingeniería Química* (Vol. 33, Issue 377)
35. United Nations. (2018). *Sustainable Development Goal 6 Synthesis Report 2018 on Water and Sanitation*. New York: United Nations Publications.
36. Water Environment Federation. (1981). *Biofilm reactors*. Mc Graw Hill. USA.
37. Welter, A. B., Romero, J. M., Grumelli, Y. A., Sánchez, J. A., & Ascar, G. I. (2004). *La biopelícula en los procesos RBC*. 1978, 1–17.
38. Xu, Y., Wu, Y., & Sun, Q. (2014). Flow characteristics of the raw sewage for the design of sewage-source heat pump systems. *Scientific World Journal*, 2014.
39. Zeeman, G. (2001). Decentralised sanitation and reuse. In *Water 21* (Issue APR.).
40. Zeeman, Grietje. (2009). Centralised or decentralised sanitation chains? *Nieuwe Uitdagingen*, 101–109.

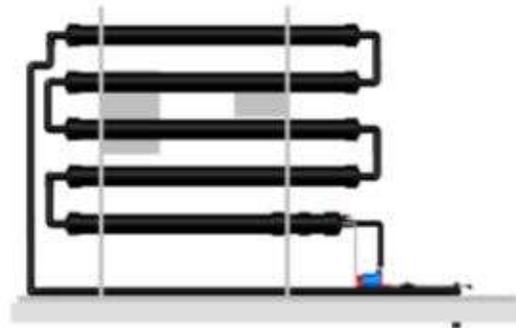




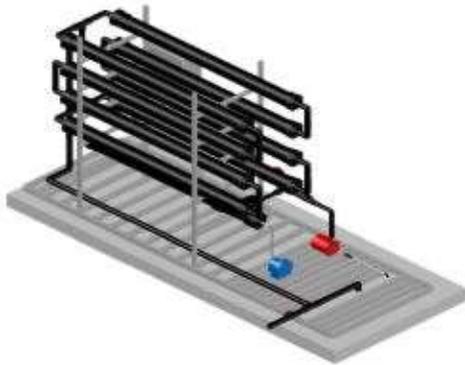
## Anexo A: Diversas vistas del modelo 3D del Reactor Biológico Tubular.



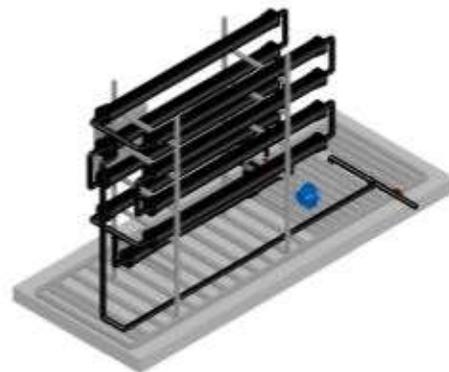
Vista Frontal



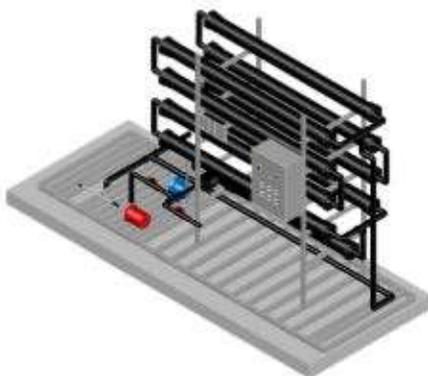
Vista Posterior



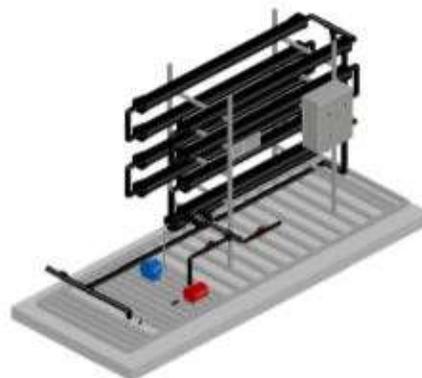
Vista Isométrica  
Noroeste



Vista Isométrica  
Noreste



Vista Isométrica  
Sureste



Vista Isométrica  
Sudoeste





Anexo B: Proceso de armado del prototipo A.

**Anexo B: Proceso de armado del prototipo A.**





## Anexo B: Continuación





Anexo C: Proceso de armado del prototipo B.

**Anexo C: Proceso de armado del prototipo B.**





## Anexo C: Continuación

