

**TÍTULO PROPUESTA DE GRADO:
DISEÑO Y MONTAJE DE UN REACTOR DE OXIDACIÓN AVANZADA PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE COLOMBIA**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

PRESENTADO POR:

**NOMBRE: STEVEN VELÁSQUEZ TRIGOS
CÓDIGO: 507181**

**NOMBRE: BRAYAN ESTIBEN HUERTAS MARTÍNEZ
CÓDIGO: 507260**

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
MODALIDAD ALTERNANCIA
BOGOTÁ D.C.
2021**

**DISEÑO Y MONTAJE DE UN REACTOR DE OXIDACIÓN AVANZADA PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE COLOMBIA**

ELABORADO POR:

NOMBRE: STEVEN VELÁSQUEZ TRIGOS

CÓDIGO: 507181

NOMBRE: BRAYAN ESTIBEN HUERTAS MARTÍNEZ

CÓDIGO: 507260

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

DIRECTOR

PHD. WILFREDO MARIMÓN BOLÍVAR

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
MODALIDAD ALTERNANCIA
BOGOTÁ D.C.
2021**



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](#). [Advertencia](#).

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia](#).

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Bogotá, 7, julio, 2021

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos en primer lugar a Dios por permitirnos contar con la sabiduría y el entendimiento para lograr cumplir los objetivos del trabajo de grado, a la Universidad Católica de Colombia por darnos la posibilidad de realizar las prácticas de laboratorio en sus instalaciones teniendo en cuenta la situación que se vive actualmente, así mismo a nuestro asesor PhD. Wilfredo Marimón Bolívar por su acompañamiento, apoyo y por compartir su valioso conocimiento y su experiencia con nosotros que fue de gran ayuda para el desarrollo de este trabajo de grado. Al señor laboratorista Javier Mendoza por su gran apoyo en cada una de las prácticas de laboratorio realizadas.

DEDICATORIA

Este logro se lo dedico principalmente a Dios nuestro señor por haberme dado la oportunidad de finalizar la carrera. A mis queridos padres Jorge Velásquez y Lorena Trigos quienes fueron un apoyo incondicional en los momentos difíciles a lo largo de la carrera, así como su esfuerzo por hacer todo lo posible para que a lo largo de tiempo no me hiciera falta nada. A mi hermana Camila Velásquez por ser una persona querida y generosa en los momentos donde necesité su ayuda. A mis abuelos y tíos por motivarme y ser personas de apoyo para mí. Y por último a todos mis amigos, compañeros de estudio y personas allegadas que brindaron su granito de arena para que todos mis proyectos y trabajos salieran de la mejor manera, ¡¡muchas gracias!!

Steven Velásquez Trigos

Le agradezco en primera medida a Dios por darme la sabiduría para culminar este proceso, a mi papá y a mi mamá, Gonzalo Huertas y Enriqueta Martínez, por su apoyo incondicional en este tiempo en el cual me formé como Ingeniero Civil además de esto por ser mi motivación día a día, por otro lado, a mi hermano Sergio Huertas Martínez porque es quien me inculcó el amor por la ingeniería, quien me brindó su apoyo en cada una de las dificultades que presenté en el transcurso de mi carrera y a las personas mencionada anteriormente, agradezco el esfuerzo económico realizado para poder brindarme la oportunidad de estudiar esta hermosa carrera y por celebrar los triunfos que obtuve a través de este tiempo, agradecer a mi grupo de amigos con los cuales tuve la oportunidad de compartir triunfos y muchos momentos que me ayudaron en mi crecimiento personal y a mi novia Karen Infante, por brindarme su apoyo y paciencia en este camino.

Brayan Estiben Huertas Martínez

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	12
2.	PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	14
3.	JUSTIFICACIÓN	16
4.	ESTADO DEL ARTE	18
5.	ANTECEDENTES.....	20
6.	MARCO DE REFERENCIA	21
6.1.	MARCO TEÓRICO	21
6.2.	MARCO CONCEPTUAL.....	33
6.3.	MARCO LEGAL.....	34
6.4.	Legislación nacional	34
6.5.	Legislación internacional	36
7.	OBJETIVOS	37
7.1.	OBJETIVO GENERAL.....	37
7.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	37
8.	ALCANCE Y LIMITACIONES	38
8.1.	ALCANCE.....	38
8.2.	LIMITACIONES	38
9.	METODOLOGÍA.....	39
9.1.	VARIABLES DEL DISEÑO DEL EXPERIMENTO	39
9.2.	PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL AGUA	39
9.3.	REVISIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE CONFIGURACIÓN DE REACTORES DE OXIDACIÓN AVANZADA	40
9.4.	CONSTRUCCION Y DISEÑO DEL REACTOR.....	40
9.5.	OXIDACIÓN CON OZONO + UV	43
10.	EVALUACION DE LA EFICIENCIA.	44
11.	RESULTADOS	45
11.1.	DISEÑO REACTOR DE OXIDACIÓN AVANZADA	45
11.2.	MONTAJE DE REACTOR DE OXIDACIÓN AVANZADA.....	47
11.3.	PREPARACIÓN DE AGUA SINTÉTICA.....	48

11.3.1.	DOSIFICACIÓN DE LA MUESTRA	48
11.4.	PRUEBAS DEL REACTOR DE OXIDACIÓN AVANZADA	49
12.	EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL REACTOR DE OXIDACIÓN AVANZADA.....	56
12.1.	Prueba de remoción de azul de metileno con Ozono + lámpara UV.....	56
12.2.	Prueba de remoción de azul de metileno con lámpara UV	58
12.3.	TRAMPA DE OZONO	59
13.	DISCUSION DE RESULTADOS	60
13.1.	PRUEBA DE OZONO + LUZ UV	60
13.2.	PRUEBA DE LUZ UV.....	60
13.3.	RELACIÓN ENTRE PH, ABSORBANCIA Y TEMPERATURA.....	60
13.4.	EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL REACTOR	61
14.	RECOMENDACIONES	62
14.1.	DISEÑO	62
14.2.	PRÁCTICAS DE LABORATORIO.....	63
14.3.	TOMA DE DATOS	63
15.	CONCLUSIONES	64
16.	REFERENCIAS.....	65
17.	ANEXOS	69

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Poblaciones sin servicio de agua potable según la Organización Mundial de la Salud	16
Ilustración 2 Escala de pH	23
Ilustración 3 Ultrafiltración UF	27
Ilustración 4 Nanofiltración NF	27
Ilustración 5 Tecnología de Membrana	28
Ilustración 6 Adsorción con carbón activado	28
Ilustración 7 Oxidación avanzada	30
Ilustración 8 Reactor CSTR (perfectamente agitado)	30
Ilustración 9 Reactor tipo PFR (flujo en pistón)	30
Ilustración 10 Reactor tipo Batch	31
Ilustración 11 Montaje experimental reactor anaerobio	31
Ilustración 12 Etapas de un ciclo de operación de un reactor SBR	31
Ilustración 13 Representación esquemática de la configuración del equipo experimental	32
Ilustración 14 RCM para Procesos de Oxidación	32
Ilustración 15 Metodología (<i>Autores</i>)	33
Ilustración 16. Esquema de reactor	41
Ilustración 17. Elección de reactor y material	42
Ilustración 18 Yoduro de potasio	43
Ilustración 19 Configuración del reactor discontinuo tipo Batch en 2D	45
Ilustración 20 Configuración del reactor discontinuo tipo Batch en 3D	46
Ilustración 21 Montaje de reactor de oxidación avanzada	47
Ilustración 22 Agua residual sintética	49
Ilustración 23 Gráfico de resultados de temperatura, prueba ozono + lámpara UV	50
Ilustración 24 Gráfico de resultados de pH, prueba ozono + lámpara UV	51
Ilustración 25 Gráfico de resultados de temperatura, prueba lámpara UV	52
Ilustración 26 Gráfico de resultados de pH, prueba lámpara UV	52
Ilustración 27 Gráficos de resultados de absorbancia, prueba Ozono + lámpara UV	54
Ilustración 28 Gráficos de resultados de absorbancia, prueba lámpara UV	55
Ilustración 29 Curva de calibración	56
Ilustración 30 Trampa de ozono	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de los plaguicidas según su vida media de efectividad.....	15
Tabla 2 Características físicas del agua	21
Tabla 3 Características químicas del agua	23
Tabla 4 Clasificación de la Dureza por CaCO ₃ en el Agua, Según OMS.....	24
Tabla 5 Contaminantes orgánicos persistentes	26
Tabla 6 Legislación nacional.....	34
Tabla 7 Convenio de Estocolmo	36
Tabla 8 Variables.....	39
Tabla 9 Caracterización del agua residual sintética	39
Tabla 10 Método para la caracterización de parámetros.....	40
Tabla 11 Dosificación de la muestra	48
Tabla 12 Datos de pH y temperatura prueba de remoción de azul de metileno con Ozono + lámpara UV.....	50
Tabla 13 Datos de pH y temperatura de prueba de remoción de azul de metileno con lámpara UV.....	51
Tabla 14 Datos de absorbancia prueba ozono y lámpara UV	53
Tabla 15 Datos de absorbancia prueba con Lámpara UV.....	54
Tabla 16 Conversión de absorbancia a concentración, prueba con Ozono + lámpara UV.....	57
Tabla 17 Conversión de absorbancia a concentración, prueba con lámpara UV	58

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Generación del radical hidroxilo	29
Ecuación 2 Ecuación de reacción química Ozono + Luz UV.....	43
Ecuación 3 Ecuación de reacción química yoduro de potasio + ozono	43
Ecuación 4 Ecuación de eficiencia.....	44
Ecuación 5 Ecuación de eficiencia.....	56

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Programación de laboratorios.....	69
--	----

RESUMEN

Se utilizaron técnicas de oxidación avanzada (ozonización y exposición a luz ultravioleta (UV)) en un reactor discontinuo tipo batch como métodos de remoción del colorante azul de metileno componente principal del agua residual sintética que reproduce las características del agua proveniente de los vertimientos de la industria textil, esto con el fin de abordar nuevas técnicas de tratamiento hacia estas aguas contaminantes y así mitigar el impacto ambiental, por otro lado el agua residual sintética se utilizó para evaluar la eficiencia del reactor por medio de la degradación del azul de metileno la cual fue medida por medio de espectrofotometría.

El montaje de este reactor se realizó en la Universidad Católica de Colombia en el laboratorio de análisis de aguas.

1. INTRODUCCIÓN

El agua se encuentra en el foco de la sostenibilidad y es de gran importancia para el crecimiento socioeconómico, la energía, la producción de alimentos, los ecosistemas y para la subsistencia de los seres humanos. El agua también hace parte decisivo de la adecuación al cambio climático, y es un definitivo nexo entre la sociedad y el medioambiente. (UNIDAS, 2020)

Por otro lado, los recursos hídricos son aquellas masas de agua existentes en el planeta tierra y van a partir de los océanos hasta los ríos teniendo en cuenta otros cuerpos de aguas con menor caudal como los ríos o lagos. Los recursos hídricos se localizan debajo de una presión sin antecedentes en la mayor parte de los países. La comunidad mundial crece a un ritmo acelerado, y según evaluaciones, de seguir las costumbres actuales, el mundo afrontará una pérdida del 40 % dentro de la demanda predicha y el agua aprovechable para 2030. Hoy en día, cerca del 70 % del agua que se obtiene en el mundo se dedica para la agricultura. (MUNDIAL, 2017)

El agua es uno de los recursos más importantes para conservación de la humanidad y la preservación del medio ambiente, pero el mal trato ha llevado a que sea impactada, gracias a la contaminación sobre ella. La contaminación es causada generalmente por acciones de la humanidad debido a que fábricas y demás causantes añaden agentes contaminantes, causantes tales como tuberías y sistemas de alcantarillado, manufacturas, plantas de tratamiento de aguas residuales, yacimientos de minerales subterráneas, excavaciones petrolíferas, barcos petroleros, expulsión de ácidos en el aire, tránsito, contaminantes en los afluentes naturales y que entran en las aguas subterráneas . (Lenntech, 2014)

Para la reutilización del agua residual se deben implementar tratamientos con el objetivo de renovar sus características físicas, químicas y biológicas además de disminuir la cantidad de contaminantes presentes en su composición por la razón anterior, esta propuesta tiene como objeto el estudio de la eliminación de cloruro de metiltionina (azul de metileno) presente en el agua, ya que los colorantes son inconvenientes de gran consideración que exige una solución inmediata puesto que, abiertamente perjudica los recursos naturales pues continuamente es más frecuente que en las aguas residuales domesticas e industriales hallemos elevados niveles de contaminantes que son difíciles de tratar con métodos populares, de manera que solicitan tecnologías específicas para su tratamiento. (Santos Altos,

2018). Por tal motivo, esta propuesta busca realizar el planteamiento y montaje de un reactor de oxidación avanzada para el manejo de aguas residuales, donde su eficiencia será medida a través de la remoción de azul de metileno.

2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente la población mundial es de 7700 millones de habitantes según las Naciones Unidas. En el mundo se estima que hay 1386 millones de km^3 , que de estos el 2.5% es agua dulce y corresponde a 34.65 millones de km^3 . De ese 2.5% el 0.007% del agua dulce es agua potable, o sea 2425.5 kilómetros cúbicos. Relacionando este dato con el número de personas que hay actualmente, se llega a la conclusión de que a cada habitante le corresponde 315 metros cúbicos de agua potable.

Según el artículo publicado por la UNESCO, tomar la falta y la calidad del agua: “La falta de agua es una anomalía natural, pero incluso es un fenómeno introducido por la humanidad. La degeneración de la calidad del agua ayuda a aumentar a la carencia de este recurso. Esta es una postura importante en el uso de los recursos hídricos, los cuales han sido aplicados sin importancia. La pésima calidad del agua tiene muchas secuelas para la sanidad en las personas y en el medio ambiente, que transforman al recurso no idóneo para su consumo, otorgando una baja utilización de los recursos hídricos. efectivamente, la contaminación del agua ha acontecido en uno de los grandes avisos para la disposición y reúso del agua dulce. El crecimiento acelerado de las urbes, el incremento del sector agrícola, el uso de fertilizantes y plaguicidas, la degeneración del suelo, los elevados números del crecimiento poblacional y la poca eliminación de residuos dañifican la disponibilidad de los recursos de agua dulce”. (UNESCO, Abordar la escasez y la calidad del agua., 2015)

En general, todas las labores para la producción de beneficios para la comunidad originan contaminantes y productos secundarios no anhelados. Los contaminantes más importantes y comunes en el agua generados por el trabajo de la humanidad se encuentran microbios patógenos, nutrientes, sustancias que agotan el oxígeno del agua, metales pesados y materia orgánica perseverante, así como residuos en suspensión y pesticidas, los cuales, en su mayoría, vienen de fuentes difusas (no localizadas). (UNESCO, Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP), 2009)

Los contaminantes emergentes comprenden una masiva gama de combinación de químicos, productos farmacéuticos, productos de cuidado personal, plastificantes y agregados industriales, que no se encuentran comprendidos en la vigilancia actual de planes de tratamiento de aguas; también incorporan un resumen de nuevos compuestos químicos o cambios en su utilización y disposición de los productos químicos ya existentes 13, 14, de los cuales existe una restringida información disponible sobre el efecto que ocasiona en la salud humana.

El glifosato es actualmente el herbicida más utilizado en el mundo, con incrementos bastante dramáticos en el uso del sector agrícola desde la inclusión de cultivos más fuertes al glifosato. La degradación microbiana produce amino metilfosfónico (AMPA) y se ha confirmado que el AMPA genera problemas en la salud. La alta tasa de solubilidad en agua del glifosato y su metabolito ha representado un análisis bastante complejo.

En la región andina, específicamente en el departamento de Antioquia, en un estudio ejecutado en el municipio de San Pedro, genera desasosiego por el uso generalizado de plaguicidas de toxicidad alta como Lorsban (Clorpirifos), Ráfaga (Clorpirifos), Látigo (Clorpirifos), Neguvon (Metrifonato), Furadán (Carbofurán), Ganabaño y (Cipermetrina), que posteriormente son llevados por la escorrentía a ríos. (Miriam Janet Gil, 2012)

Teniendo en cuenta que los plaguicidas hacen parte de los tipos de contaminantes más frecuentes en el agua, se toma la siguiente tabla del artículo mencionado anteriormente:

Tabla 1 Clasificación de los plaguicidas según su vida media de efectividad

Persistencia	Vida media	Ejemplos
No persistente	De días hasta 12	Malatión, diazinón, carbarilo, diametrín
Moderadamente persistente	Semanas	Paratión, lannate
Persistente	De 1 a 18 meses	DDT, aldrín, dieldrín
Permanentes	De varios meses	Productos hechos a partir de mercurio, plomo, arsénico

Fuente: (Miriam Janet Gil, 2012)

El río Bogotá es uno de los cuerpos hídricos más reconocidos en Colombia por su alto grado de contaminación. Desde su origen en el páramo de Guacheneque, en el municipio de Villa Pinzón. Las principales fuentes de contaminación son los efluentes industriales de las curtidurías de este municipio emplazado a 5 kilómetros del nacimiento, la deforestación, la toma ilegal de recursos hídricos, el vertido de desechos humanos e industriales. La falta de plantas de tratamiento que realicen un proceso eficiente de sus aguas domésticas y el desagüe sus aguas en mal estado al río incluida Bogotá ocasionando el 80% de la contaminación. El 20% remanente lo generan las industrias, la minería extractiva y residuos de la construcción y diversas actividades antrópicas. (CUNDINAMARCA, 2018)

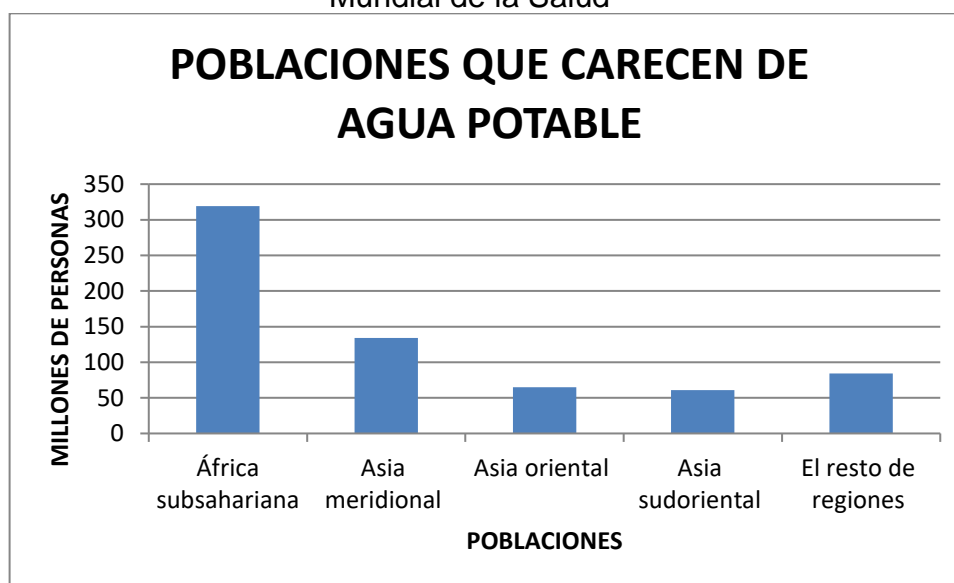
En vista a lo mencionado anteriormente y a la carencia de equipos que realicen el proceso de descontaminación del agua, ***¿cuál es el diseño más eficiente de un reactor de oxidación avanzada para el tratamiento de aguas que contengan compuestos orgánicos persistentes de difícil degradación?***

3. JUSTIFICACIÓN

La hidrosfera del planeta tierra se compone, principalmente por agua salada y en menor proporción por agua dulce (97.5% - 2.5% respectivamente), pero no toda el agua dulce es consumida por la población ya que solo el 0,007% es potable, por lo tanto, se puede satisfacer o dotar de este servicio solo a 6600 millones de personas en todo el mundo.

Muchas zonas del planeta carecen de agua potable por lo cual se generan muchas muertes por enfermedades que se transmiten gracias a la contaminación de este líquido (cerca de 502.000 muertes al año). Las principales enfermedades que provienen de agentes contaminantes del agua son: diarrea, cólera, disentería, fiebre tifoidea, poliomielitis. (Salud, Agua, 2019)

Ilustración 1 Poblaciones sin servicio de agua potable según la Organización Mundial de la Salud



Fuente: (Salud, Agua, saneamiento e higiene, 2015)

En la sociedad actual, un gran número de compuestos químicos son descargados al ambiente. Muchos de ellos reciben un tratamiento previo ya sea físico, químico o biológico y son degradados fácilmente, sin embargo, existen algunos compuestos refractarios difíciles de eliminar como los son colorantes, compuestos aromáticos, plaguicidas, los cuales se excluyen de la posibilidad de recibir un tratamiento de tipo convencional, por lo que se requiere el desarrollo de métodos especiales para remover estos contaminantes en aguas residuales. Para solucionar estos problemas se han desarrollado diversas tecnologías como los procesos de oxidación avanzada (POA) para la remoción de materia orgánica.

“Los Procesos de Oxidación Avanzada (Advanced Oxidation Processes AOPs) son responsables de radicales hidroxilos ($\text{OH}\cdot$), con probabilidad de oxidación mucho más efectiva que otros oxidantes típicos (ozono, peróxido de hidrógeno, cloro...) Los AOPs son procesos físico-químicos idóneos de realizar cambios abismales en la estructura química de los contaminantes”. Este proceso de tratamiento tiene grandes ventajas puesto que destruyen químicamente los contaminantes hasta dejarlos en un proceso de mineralización además de tener la propiedad de no generar subproductos para su posterior tratamiento, por otro lado poseen características para el tratamiento de contaminantes incombustibles que son infatigables a otros procedimientos de tratamiento, primordialmente el orgánico de igual importancia tienen rangos de operación donde los sistemas convencionales no obtienen buenos resultados y por ultimo aumenta la biodegradabilidad de la materia orgánica. (Forero Jorge Enrique, 2005)

4. ESTADO DEL ARTE

En la actualidad existen muchos tratamientos para aguas contaminadas con materia orgánica persistente y de los cuales se han donde tuvo como objetivo la detoxificación de aguas contaminadas con plaguicidas teniendo como resultado la viabilidad para depurar aguas contaminadas con imidacloprid por medio de luz ultravioleta natural utilizando dos sistemas los cuales son fotocátalisis heterogénea con TiO_2 y fotocátalisis homogénea con foto-Fenton. (Vázquez, 2002)

“Los contaminantes orgánicos emergentes hacen parte de un grupo de elementos muy heterogéneas, cuya peculiaridad conjuntamente es que originan efectos nocivos sobre los organismos acuáticos, de manera que deben ser excluidos del medio ambiente”. Por este motivo, se hace imprescindible la valoración y perfección de tratamientos más perdurables, los procesos que hacen parte a este grupo de tratamientos son la oxidación avanzada y de filtración por membranas. “Los resultados presentados en el documento “Procesos de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de contaminantes orgánicos emergentes” presentado en el año 2013 por Ainhoa Rubio Clemente, Edwin Lenin Chica Arrieta y Gustavo Antonio Peñuela Mesa”, muestran que el proceso foto-Fenton facilitan un alto grado de remoción de estas sustancias en semejanza con el proceso Fenton, quizás debido a la superior suma de radicales hidroxilo libres generados. (Ainhoa Rubio Clemente, 2013)

En un estudio similar presentado por Mery C. Terán Solíz en el año 2016 llamado “Estudio de la aplicación de procesos de oxidación avanzada a aguas contaminadas” en el cual se hace el tratamiento de aguas contaminadas por antibióticos que están compuestos por Sulfaquinoxalina, principal componente para la creación de antibiótico, antiparasitarios y coccidiostáticos, permitió la caracterización de la degradación de éste antibiótico mediante los procesos de oxidación avanzada Fenton y Foto-Fenton. (Solíz, 2016)

En el 2018 se presentó un estudio donde se mencionan los últimos avances y tendencias futuras en el campo de oxidación avanzada, estas investigaciones se hicieron con respecto a los procesos mixtos, la inserción de nanomateriales y el cambio de las fuentes de energía y de radiación. Estos procesos mejoran la eficiencia de la mineralización de los contaminantes, asimismo el decrecimiento de los problemas de los procesos individuales, logrando la expulsión de compuestos aromáticos, tinturas, compuestos farmacéuticos y pesticidas. Los nanomateriales ayudan a la realización de procesos con la menor energía posible finalmente la implementación de ultrasonidos y microondas para la producción de hidroxilos y peróxidos para así reducir costos y la utilización de menos reactivos. (Torices, 2018)

En el mismo año se llevó a cabo la investigación “Diseño, construcción y evaluación del desempeño de un reactor de carga secuencial para tratamiento de aguas residuales de tenerías” teniendo en cuenta que el método de tratado biológico de las aguas residuales es un proceso de oxidación en el cual la materia orgánica biodegradable es descompuesta por la acción de los microorganismos en un medio controlado que puede ser aeróbico o anaeróbico. En consecuencia, este proyecto consistió en el uso de biomasa granular y biomasa suspendida para medir el desempeño del reactor de carga secuencial, para de esta forma concluir que por medio de ciclos de 6,12 y 24 horas la tasa de remoción de la DQO (Demanda Química de Oxígeno) es 2 veces mayor cuando se usa biomasa suspendida y con respecto a la biomasa granular se encontró un porcentaje de remoción de la DQO del 25% en condiciones anaerobias y 75% en condiciones aerobias. (Freytez Estefania, 2018)

5. ANTECEDENTES

Dentro del semillero a cargo del Doctor Wilfredo Marimón, se han venido trabajando diferentes investigaciones sobre el tratamiento de aguas residuales utilizando procesos de oxidación avanzada, investigaciones tales como:

- “Tratamiento de agua residual de la industria textil diseñando un reactor de oxidación avanzada”, este proyecto tiene como elemento principal establecer las condiciones óptimas de operación de un reactor de oxidación avanzada por medio de procesos foto-catalíticos que permitan el tratamiento y reúso de aguas residuales de las plantas de producción textil, donde por medio de la caracterización de una muestra y su respectiva preparación se procederá a hacer un tratamiento de la misma para una posterior síntesis del material con el fin de realizar una caracterización del nanomaterial y así a través de pruebas de remoción de colorantes con ZnO (Óxido de Zinc), ozono, peróxido de hidrógeno y luz UV para realizar una validación de eficiencia por medio de gráficas donde se evidencia el porcentaje de degradación calculado contra el tiempo.
- “Tratamiento de agua residual de la industria textil empleando un diseño de oxidación avanzada como tratamiento terciario”, la investigación tiene como objetivo plantear la configuración adecuada del diseño de un reactor de oxidación avanzada para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil, para eliminar compuestos orgánicos de difícil degradación para así poder reutilizar el agua residual.

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1. MARCO TEÓRICO

6.1.1. Absorbancia

La absorbancia tiene relación con la cantidad de luz que es capaz de absorber una muestra. (Nieves Abril Díaz, 2018)

6.1.2. Agua

El agua es un recurso natural muy importante ya que es esencial para suplir las necesidades de la humanidad, teniendo en cuenta el desarrollo de actividades, que tienen como objetivo la obtención de alimentos, energía y el mejoramiento de la salud. (Anada Tiéga, 2010)

6.1.3. Calidad del agua

La calidad del agua tiene relación directa con los parámetros físicos, microbiológicos y químicos que contiene el agua, de esta forma se comparan con las normativas vigentes en cada lugar.

6.1.4. Características físico químicas del agua

Las características físico químicas del agua depende directamente del uso que se le dé al líquido.

6.1.5. Características físicas

Son aquellas que se detectan sensorialmente. Para efectos de evaluación, el sabor y olor se ponderan por medio de los sentidos y el color y la turbiedad se determinan por medio de métodos analíticos de laboratorio. El agua para consumo humano no podrá sobrepasar los valores máximos aceptables para cada una de las características físicas que se señalan a continuación:

Tabla 2 Características físicas del agua

Características físicas	Expresadas como	Valor máximo aceptable
Color aparente	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15
Olor y Sabor	Aceptable ó no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT)	2

Fuente: (MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL MINISTERIO DE AMBIENTE, 2007)

Con respecto a la tabla 2, se definen las siguientes características:

6.1.5.1. Color

El color en el agua es generado por coloides y sustancias disueltas, en este orden de ideas, también por la descomposición de materia vegetal, descargas de industrias y la disolución de minerales que están en el subsuelo. Esta característica se puede diferenciar por color aparente y color verdadero.

El color aparente es el generado por el material suspendido en comparación con el color verdadero que es el que continua después de que la turbiedad es removida. (Ramirez, 2011)

6.1.5.2. Olor y sabor

La presencia de sustancias no deseadas son la causa del cambio de color y la presencia de olor en el agua. La variación de estas características tiene relación directa con la descomposición de materia orgánica, presencia de algas o plancton. (Ramirez, 2011)

6.1.5.3. Turbiedad

La turbiedad es la capacidad del material suspendido para no permitir el paso de la luz. (Ramirez, 2011)

6.1.5.4. Temperatura

La temperatura es una característica importante ya que llega a afectar parámetros como la viscosidad y la velocidad en la que se efectúan las reacciones en el agua, además de esto, es parte de todos los procesos de tratamiento de agua. (coagulación, sedimentación, etc.). (Ramirez, 2011)

6.1.5.5. Actividad biológica

Los cambios de temperatura son soportados por los organismos presentes en el agua, ya que estos toleran cambios estacionales debido a que sus ciclos de vida están acoplados a estos cambios, pero las descargar de agua a altas temperatura causa daños en la flora y fauna de los que cuerpos de agua que la reciben porque aumentan el crecimiento bacteriano y disminuyen la reproducción de especies.

6.1.6. Características químicas

Son aquellas debidas a elementos o compuestos químicos, que como resultado de investigación científica se ha comprobado que pueden causar efectos nocivos a la salud humana.

6.1.6.2. Conductividad

Es la medida que tienen las soluciones acuosas para conducir la corriente eléctrica, pero está supeditada a características como su concentración, valencia, temperatura y presencia de iones. Las soluciones de compuestos inorgánicos son buenas conductoras en comparación a las de compuestos orgánicos, que no lo son. (Instituto de Hidrología, 2006)

6.1.6.3. Alcalinidad

La alcalinidad es la capacidad de una sustancia de neutralizar un ácido, indica el cambio que ocurrirá en el pH con la adición de ácidos. La medición de este parámetro en aguas naturales se debe a la presencia de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos.

Se determina en forma volumétrica utilizando el método de titulación, para esto se emplea un ácido fuerte. Generalmente se utiliza Fenolftaleína y naranja de metilo.

6.1.6.4. Dureza

Es la concentración de compuestos minerales en una muestra de agua, como lo más común es el magnesio y el calcio. El agua se clasifica como dura cuando tiene una alta concentración de estas sales y agua blanda es todo lo contrario.

La presencia de estas sales se debe a las formaciones geológicas que intervienen en la conducción del agua hasta que es captada, por ejemplo, las aguas subterráneas que cruzan por medio acuíferos carbonatados presentan una mayor dureza ya que tienen alta concentrado de magnesio y calcio. (agua, 2016)

Las aguas se clasifican según el grado de dureza en:

Tabla 4 Clasificación de la Dureza por CaCO₃ en el Agua, Según OMS

Concentración de CaCO ₃ /mg/L	Tipo	Codificación*
0 - 60	Blanda	Azul
61 - 120	Moderadamente dura	Verde
121 - 180	Dura	Amarillo
>180	Muy dura	Rojo

Fuente: (Zamora, 2009)

6.1.6.5. Demanda química de oxígeno DQO

Es la cantidad de oxígeno consumido por los cuerpos reductores presentes en el agua sin la intervención de los organismos vivos. Efectúa la determinación del contenido total de materia orgánica oxidable, sea biodegradable o no. (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia)

6.1.6.6. Demanda bioquímica de oxígeno DBO

Es la cantidad de oxígeno que se necesita para lograr la descomposición de la materia orgánica por medio acción bioquímica aerobia, este parámetro permite determinar la cantidad de materia orgánica que es biodegradable. (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia)

6.1.7. Aguas residuales

Son aquellas que pueden venir de la combinación o no, de aguas negras (Orina y excremento), aguas grises (Aguas de lavado y baño), agua de instituciones y establecimientos comerciales, hospitales, escorrentías urbanas, aguas pluviales, aguas industriales y de las actividades agrícolas. (UNESCO, AGUAS RESIDUALES EL RECURSO DESAPROVECHADO, 2017)

6.1.8. Aguas residuales domésticas

Son las aguas que vienen de las viviendas y generadas principalmente por actividades domésticas y de metabolismo humano.

6.1.9. Aguas residuales industriales

Son el resultado del vertimiento de agua que fue utilizada para procesos industriales o comerciales y que no tiene relación con aguas residuales domésticas o de escorrentía pluvial.

6.1.10. Aguas residuales urbanas

Son la mezcla de agua residual doméstica, agua residual industrial o agua de escorrentía pluvial, como característica principal son aquellas que habitualmente se recogen por medio de un sistema colector y son enviadas por conducción terrestre a una planta de tratamiento EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales). (Antonio Rodríguez Fernández-Alba)

6.1.11. Contaminantes orgánicos persistentes

Los contaminantes orgánicos persistentes (COP), también conocidos internacionalmente para sus siglas en inglés POP: persistente organic pollutants, son sustancias químicas tóxicas, resistentes a la degradación, que se acumulan en tejidos de seres vivos y que pueden transportarse a gran distancia de la fuente, rasgos que suponen una amenaza global para la salud humana y el medio ambiente.

Los COP son un conjunto de sustancias químicas que comparten cuatro características básicas: persistencia, bioacumulación, potencial de transporte a gran distancia en el medio y efectos adversos. Estas propiedades intrínsecas de los COP forman una combinación peligrosa que hace imposible controlarlos efectivamente una vez son liberados al medio ambiente. Por lo tanto, los contaminantes orgánicos persistentes son contaminantes para la salud y el medio ambiente, y hace falta ser conscientes de los peligros que comporta su generación y/o utilización. (Catalunya, 2015).

Los contaminantes orgánicos persistentes más peligrosos son los siguientes:

Tabla 5 Contaminantes orgánicos persistentes

Contaminante Orgánico Persistente	Formula química
Aldrina	C ₁₂ H ₈ Cl ₆
Bifenilos policlorados	C ₁₂ H _{10-n} Cl _n n = 1-10, principalmente 2-7
Clordano	C ₁₀ H ₆ Cl ₈
DDT	C ₁₄ H ₉ Cl ₅
Dieldrina	C ₁₂ H ₈ Cl ₆ O
Dioxinas	C ₁₂ H ₄ Cl ₄ O ₂
Endrina	C ₁₂ H ₈ Cl ₆ O
Furano	C ₄ H ₄ O
Heptacloro	C ₁₀ H ₅ Cl ₇
Hexaclorobenceno	C ₆ Cl ₆
Mirex	C ₁₀ Cl ₁₂
Toxafena	C ₁₀ H ₈ Cl ₈

Fuente: **(Autores)**

6.1.12. Tratamientos para aguas residuales contaminadas con compuestos orgánicos persistentes

6.1.12.1. Clarificación con coagulantes, floculación y sedimentación.

La clarificación con coagulantes es utilizada en química para desestabilizar partículas coloidales las cuales son producidas al momento de neutralizar aquellas fuerzas que los mantienen separados, causada por la adición de coagulantes y energías de mezclado.

Uno de los ejemplos de la floculación es el purificador de agua PUR que logra purificar el agua por medio de la coagulación, floculación y la desinfección. Contiene coagulantes con carga positiva, que hacen que las partículas de carga negativa se neutralicen y se acumulen en flóculos que terminan depositándose al fondo del

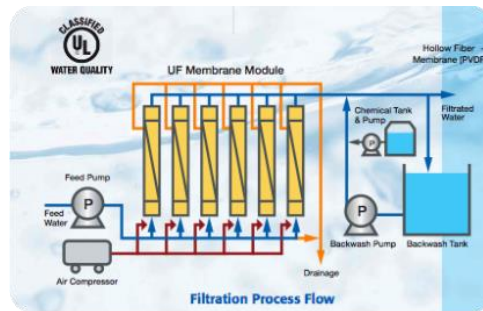
contenedor. Contiene también cloro temporizado para liberarse poco a poco eliminando los patógenos restantes, y el agua debe pasar por un proceso de filtrado para eliminar los flóculos.

6.1.12.2. Ultrafiltración UF

La ultrafiltración tiene como ventaja que produce agua de calidad constantemente, por otro lado, el espacio que se necesita para su construcción es poco.

La ultrafiltración es usada para eliminación completa de los virus, por medio de membranas de $0.001 - 0.1 \mu\text{m}$, y se usa como proceso de pre tratamiento del agua, antes de la nanofiltración y de la osmosis inversa (purificación, 2009)

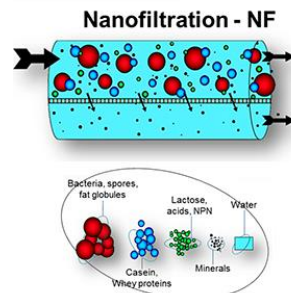
Ilustración 3 Ultrafiltración UF



6.1.12.3. Nanofiltración NF

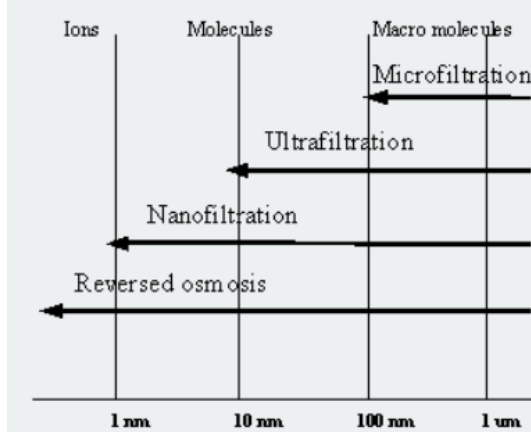
La técnica de nanofiltración (NF) es principalmente usada para la eliminación de iones divalentes y monovalentes de gran tamaño, tales como los metales pesados. Esta técnica podría asemejarse a una filtración por membrana de Ósmosis Inversa (RO) de peor calidad. Debido a que la nanofiltración utiliza membranas menos finas, la presión de alimentación de los sistemas de NF es generalmente más baja, comparada con los sistemas de RO. Además, el rango de incrustación es más bajo que el de los sistemas de RO (Lenntech, 2014)

Ilustración 4 Nanofiltración NF



Fuente: (Pack)

Ilustración 5 Tecnología de Membrana



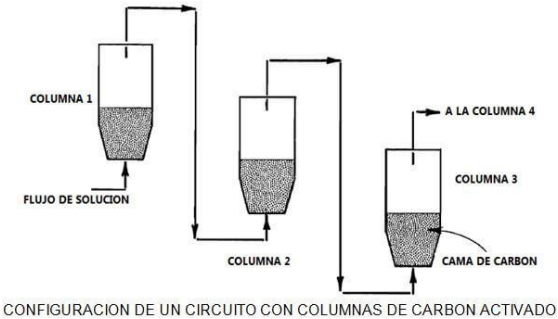
Fuente: (Lenntech, 2014)

6.1.12.4. Adsorción con carbón activado

Es una operación de transferencia de masa, proceso por el cual los átomos o moléculas de una sustancia que se encuentra en una fase determinada, son retenidas en la superficie de otra sustancia, lo que resulta en una capa de líquido o gas en la superficie de una sustancia sólida o líquida.

La combinación de medios de adsorción y de filtración mecánica pueden llegar a remover sustancias orgánicas. La adsorción es un proceso por el cual se remueve materia de una fase y se agrega a otra, puede ser gas a sólido o líquido a sólido. La sustancia concentrada en la superficie es llamada adsorbato y el sólido en adsorción es llamado adsorbente. El método de adsorción con carbón activado es un proceso de transferencia de masa donde hay transferencias de escala molecular. (Soto, 2017)

Ilustración 6 Adsorción con carbón activado



CONFIGURACIÓN DE UN CIRCUITO CON COLUMNAS DE CARBÓN ACTIVADO

Fuente: (David, 2017)

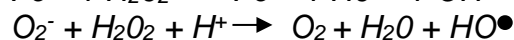
6.1.12.5. Oxidación avanzada

Los POA encuentran su aplicación principal en el tratamiento terciario, siendo el objetivo de estos procesos eliminar compuestos difícilmente biodegradables e incluso disminuir la contaminación microbiológica.

Las tecnologías de POA tienen la capacidad de oxidar una gran variedad de contaminantes, pudiendo llegar a la mineralización si el proceso se prolonga lo suficiente o quedándose en estados de oxidación intermedios que permitan un acoplamiento con otros métodos de depuración como pueden ser los procesos biológicos.

Los POA tienen como base los procesos químicos que tienen la capacidad de producir cambios en la estructura química de los agentes contaminantes, los cuales involucran la generación y uso del radical hidroxilo ($\text{OH}\cdot$). Adicionalmente, la generación de radicales por medio de oxígeno, catalizadores soportados y agua oxigenada, teniendo como reacción subproductos tales como agua y dióxido de carbono. A continuación, se muestran las Ecuaciones 1 y 2 de generación del radical hidroxilo ($\text{OH}\cdot$).

Ecuación 1 Generación del radical hidroxilo



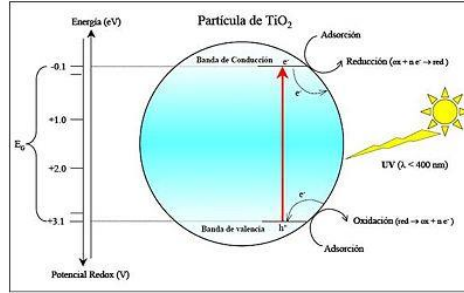
Fuente: **(Sarai Bes Monge)**

El radical hidroxilo ($\text{OH}\cdot$) tiene una alta efectividad con respecto a la oxidación de materia orgánica en condiciones tranquilas de presión y temperatura. Por la alta reactividad de estas especies es probable que se eliminen compuestos orgánicos e inorgánicos, logrando reducir parámetros como DQO, COT y toxicidad del agua.

La generación del radical hidroxilo se puede optimizar por medio de combinación de agentes oxidantes tales como peróxido de hidrogeno, sales de hierro, radiación UV y catalizadores por ejemplo el dióxido de titanio.

La clasificación de los POA se puede realizar por medio de procesos fotoquímicos y procesos no fotoquímicos teniendo en cuenta la acción de luz en el proceso. (Sarai Bes Monge)

Ilustración 7 Oxidación avanzada



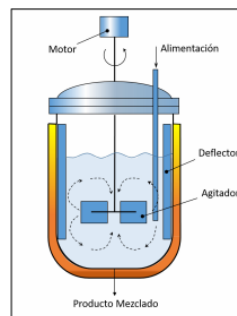
Fuente: (Wikiwand, 2015)

6.1.13. Tipos de reactores químicos

6.1.13.1. Reactor CSTR (perfectamente agitado)

Los reactores CSTR trabajan con flujos continuos, las propiedades dentro de cualquier punto del sistema son similares debido a que la muestra es perfecta, son usados en sistemas de producción constante y de grandes cantidades, debido a esto se diseñan para operar en grandes periodos de tiempo sin necesidad de parar su operación. (ANAHÍ LISBETH MOSQUERA SOLÍS, 2017)

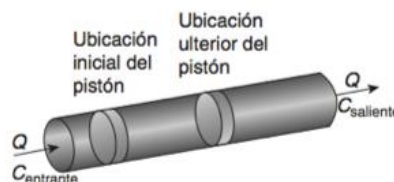
Ilustración 8 Reactor CSTR (perfectamente agitado)



6.1.13.2. Reactor tipo PFR (flujo en pistón)

Este tipo de reactores son usados cuando se necesita un flujo ordenado o para gases, también es necesario que el tiempo que el fluido este contenido en el reactor sea el mismo en todos los componentes. (ANAHÍ LISBETH MOSQUERA SOLÍS, 2017)

Ilustración 9 Reactor tipo PFR (flujo en pistón)

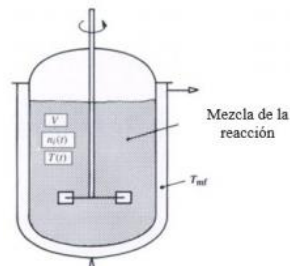


Fuente: (Veracruzana, 2020)

6.1.13.3. Reactor tipo Batch

En este tipo de reactor, los reactivos se ponen dentro hasta que reaccionan dentro manteniendo el volumen y composición, pero va a sufrir cambios con respecto al tiempo, reaccionando los reactantes, teniendo en cuenta que es una operación no estacionaria que se dará por medio del tiempo y para finalizar se realiza la descarga del producto resultante. (ULLOA, 2017)

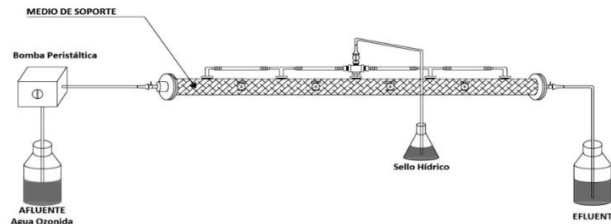
Ilustración 10 Reactor tipo Batch



A continuación, se mencionan algunos de los reactores que se han implementado en el tratamiento de aguas residuales por medio de procesos de oxidación avanzada:

Reactor anaerobio de flujo horizontal y biomasa inmobilizada (RAHLF)

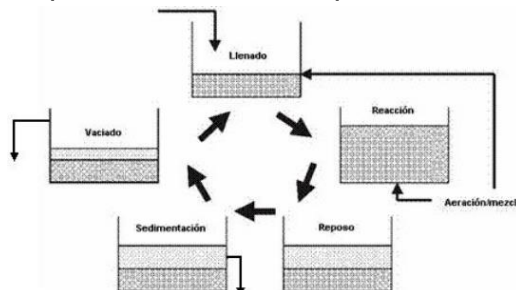
Ilustración 11 Montaje experimental reactor anaerobio



Fuente: (Muñoz Ortiz Carlos Eduardo, 2014)

Reactores secuenciales discontinuos (SBR)

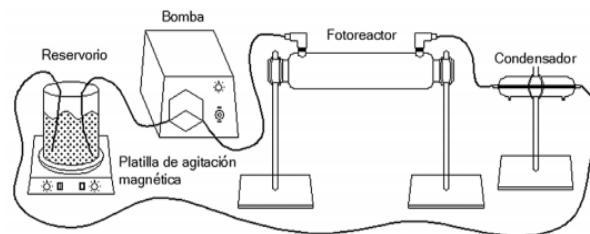
Ilustración 12 Etapas de un ciclo de operación de un reactor SBR



Fuente: (Remtavares, 2006)

Fotoreactor (MiniPure MIN-1.5, Atlantic Ultraviolet)

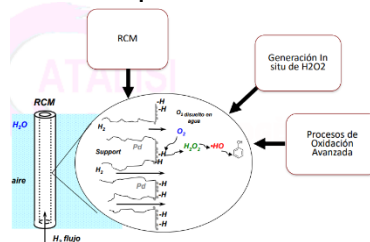
Ilustración 13 Representación esquemática de la configuración del equipo experimental



Fuente: **(Castro Peña Laura, 2014)**

Reactores catalíticos de membrana

Ilustración 14 RCM para Procesos de Oxidación



Fuente: **(Pinos Verónica)**

6.2. MARCO CONCEPTUAL

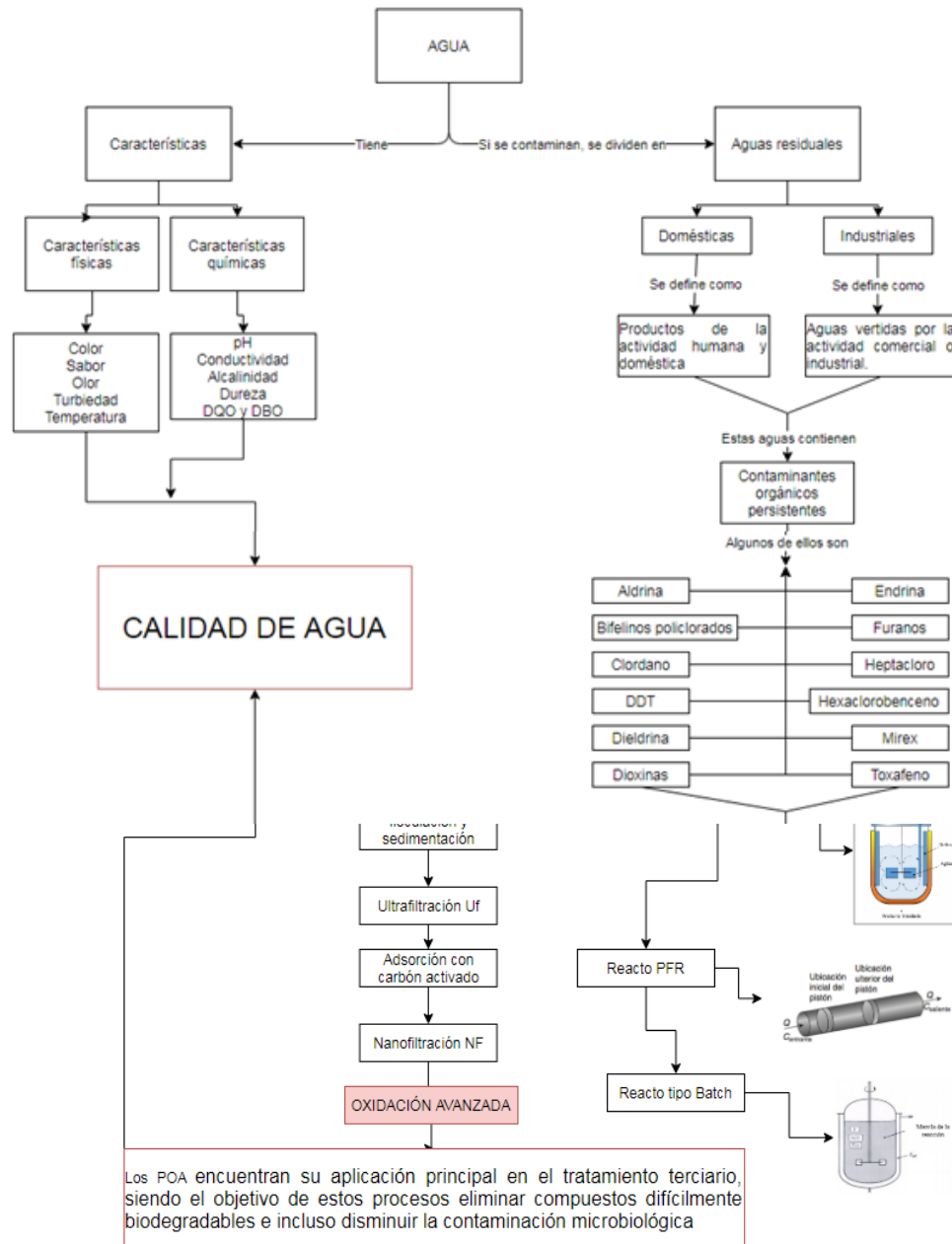


Ilustración 15 Metodología (Autores)

6.3. MARCO LEGAL

6.4. Legislación nacional

Tabla 6 Legislación nacional

Ley	Entidad	Descripción
Ley 23 de 1973	Congreso de Colombia	Se trata de prevenir y controlar la contaminación del medio ambiente y encontrar el perfeccionamiento, mantenimiento y restauración de los recursos naturales renovables, para amparar la salud y el bienestar de todos los habitantes ciudadanos colombianos.
Ley 99 de 1993	Congreso de Colombia	Tal ley reorganiza el Sector Público delegado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables.
Ley 373 de 1997		Los planes ambientales deben tener programas para el uso eficaz y ahorro del agua. Tales programas hacen referencia al uso eficaz y ahorro del agua por medio del acueducto, sistemas de alcantarillado, producción hidroeléctrica, drenaje y riego.

Continuación Tabla 6 Legislación nacional		
Decretos	Entidad	Descripción
Decreto 1443 de 2004	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial	Tiene como principal objetivo de disponer sistemas para la protección y control de la calidad del agua, con el fin de impedir posibles enfermedades causadas por su consumo a excepción del agua embotellada.
Decreto 3930 de 2010	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial	Establecen los lineamientos relacionados con el uso responsable de los recursos hídricos, su ordenamiento y los posibles vertimientos que se le hacen al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados.
Resolución	Entidad	Descripción
Resolución 2115 de 2007	Ministerio de la protección social Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial	Establecen los programas e instrumentos básicos para para el control y vigilancia para el agua de consumo humano.
Resolución 0631 de 2015	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible	Establece los criterios y valores máximos permitidos para quienes realizan vertimientos en cuerpos hídricos y al alcantarillado público.

Fuente: **(SOSTENIBLE)**

6.5. Legislación internacional

6.5.1.1. Convenio de Estocolmo

El Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes es un acuerdo internacional, fue aprobado en una Conferencia de Plenipotenciarios el 22 de mayo de 2001 en Estocolmo, Suecia. El Convenio entró en vigor el 17 de mayo de 2004 y su objetivo es proteger a la salud humana y el medio ambiente de los contaminantes orgánicos persistentes (COP).

Tabla 7 Convenio de Estocolmo

Convenio de Estocolmo	
Anexo A	Los productos químicos deben eliminarse gradualmente de la producción y el uso. Las partes contratantes deben prohibir o tomar las medidas legales y administrativas necesarias para eliminar la producción, utilización, importación y exportación de los 17 productos químicos industriales y plaguicidas. Las partes también deben adoptar medidas para minimizar o eliminar la fuga de estos productos químicos de las existencias y los desechos.
Anexo B	“Las sustancias químicas están sometidas a estrictas limitaciones de producción y uso. Estas sustancias químicas solo están aceptadas para exenciones específicas y fines aceptables indicados en el anexo. Estas excepciones pueden estar limitadas hasta 5 años, pero se puede evaluar si se mantiene hasta tal periodo de tiempo o es necesario reducirlo esto mediante la conformidad con la información técnica, ambiental y económica disponible.

Fuente: (Estocolmo, 2001)

7. OBJETIVOS

7.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un reactor piloto de oxidación avanzada para el tratamiento de aguas residuales contaminadas por compuestos orgánicos persistentes en la Universidad Católica de Colombia.

7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar variables de diseño necesarias para el buen funcionamiento de un reactor de oxidación avanzada.
- Realizar el dimensionamiento, configuración y montaje del reactor.
- Validar la capacidad de remoción de azul de metileno del reactor construido.

8. ALCANCE Y LIMITACIONES

8.1. ALCANCE

Luego de la aprobación del anteproyecto de grado, se inició al desarrollo de los objetivos necesarios para cumplir a cabalidad con la investigación, la cual consistió en el diseño y construcción de un reactor de oxidación avanzada para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil que contienen compuestos orgánicos persistentes de difícil degradación donde para el diseño se deberá seleccionar el reactor más eficiente.

8.2. LIMITACIONES

8.2.1. Retraso en la construcción por falta de componentes que integran el reactor.

8.2.2. Acceso a laboratorios para realizar el montaje y pruebas con el reactor.

8.2.3. Retrasos en la elaboración del proyecto por la pandemia originada por el covid-19.

8.2.4. Demora en la obtención de la muestra de agua residual que va a ser objeto de estudio.

Para las limitaciones planteadas se tienen los siguientes planes alternos:

8.2.5. En caso de que no sea posible la obtención de la muestra, se deberá adecuar un ejemplar alternativo con las características similares al espécimen original para hacerle las pruebas correspondientes.

8.2.6. En caso de no contar con un laboratorio para realizar las pruebas se tendrá que buscar instituciones aliadas como la Universidad Javeriana, Universidad de Cartagena y el Centro de Investigación CENIGAA (Centro de investigación en ciencias y recursos GeoAgroAmbientales).

9. METODOLOGÍA

9.1. VARIABLES DEL DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Tabla 8 Variables

Tipo de variable	Variable	Disposición	Unidad
Independiente	Concentración de ozono	Concentración 5-25mg/L	mg/L
	pH	4-9	Unidades de pH
	Luz UV	Ausencia o presencia	-
	Tiempo	De 1 min a 2 horas	-
Dependiente	Remoción de azul de metileno	-	mg de azul de metileno/L
Intervinientes	Temperatura	Toma cada minuto	-
	Agitación	Magnética	-

Fuente: **(Autores)**

9.2. PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL AGUA

El principal punto a considerar es la caracterización físico-química del agua a tratar, la cual fue sintética y desarrollada en las instalaciones de los laboratorios de hidráulica de la universidad Católica de Colombia en donde se relacionaron con las propiedades de aguas residuales procedentes de la industria textil (DBO, DQO, pH, temperatura, SST, conductividad, color y alcalinidad, fósforo, nitrógeno, grasas, cloruros y el carbón orgánico total).

Tabla 9 Caracterización del agua residual sintética

Caracterización del agua residual sintética de la industria textil	
Adición de ingredientes	Concentración (mg/L)
Urea	0,5
Ptalato	0,5
ZnCl ₂	0,04
MgSO ₄	0,017
Azul de metileno	0,01

Fuente: **(Autores)**

Posteriormente a la preparación del agua sintética con las propiedades pertenecientes a aguas residuales de la industria textil, se caracterizó cada uno de los parámetros con su correspondiente método y unidad de medición.

A continuación, se expone el método estándar para cada parámetro, así como su unidad de medida:

Tabla 10 Método para la caracterización de parámetros

PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO
pH	Unidades de pH	SM 4500 HB
Temperatura	Grados Celsius	SM 2550
Azul de metileno	gramos/Litro	Espectrofotometría

Fuente: **(Autores)**

9.3. REVISIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE CONFIGURACIÓN DE REACTORES DE OXIDACIÓN AVANZADA

Se hizo una minuciosa búsqueda de información por medio de textos, libros, bases de datos en la web, tesis de pregrado y proyectos de investigación para posgrado con el propósito de obtener información que resultó de gran ayuda en el diseño de reactores, cinética de reacción y en procesos de oxidación avanzada. A través de esta información se seleccionaron dimensiones de reactores existentes, así como su configuración más adecuada, requerimientos de espacio, subproductos formados a partir de reacciones químicas, tipos de contaminantes presentes en las aguas residuales de la industria textil, tipos de materiales a utilizar y los requerimientos de operación y de mantenimiento.

9.4. CONSTRUCCION Y DISEÑO DEL REACTOR

Para la construcción y diseño del reactor se usó la información encontrada relacionada con la caracterización del agua, los tipos de reactores, las dimensiones y configuraciones más eficientes para el tratamiento de las aguas residuales de la industria textil, la cinética de reacción y las condiciones adecuadas para un correcto funcionamiento.

El diseño y construcción se realizó a partir de los siguientes pasos:

9.4.1. Cálculos de volúmenes

Inicialmente se hizo una búsqueda de información acerca de diseño y construcción de reactores donde se obtuvo la geometría y la configuración de los demás elementos. A continuación, se mencionarán algunos de estos diseños:

Como punto de partida se tuvo en cuenta “Fluid dynamics modelling of UV reactors in advanced oxidation processes for VOC abatement applications” donde se tomó

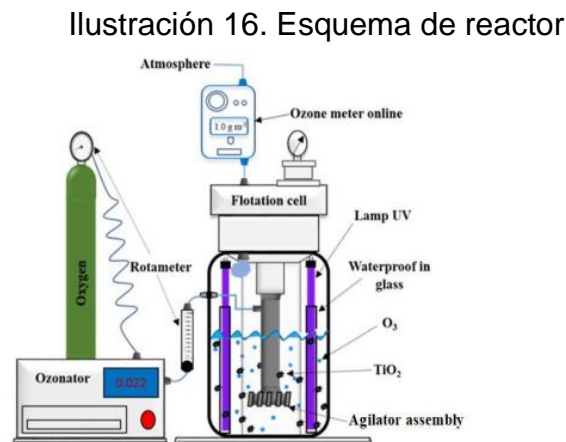
como referencia los diámetros utilizados en el presente estudio que fueron de 85, 135 y 164 milímetros. (Francesco Montecchio, 2019)

Partiendo de esta información y la altura de la lámpara UV (850mm), se configuraron los componentes del reactor, donde se tuvo en cuenta un punto importante que fue la altura del mismo, puesto que ésta tenía que ser mayor a la de la lámpara, garantizando así que todo el cuerpo de la lámpara quedara totalmente dentro del cilindro, además de esto, se decidió aumentar la altura del cilindro 50 milímetro más, a vista de que si se dejaba la altura del cilindro igual al de la lámpara, el cuerpo de dicha lámpara quedaría en contacto constante con la base del cilindro.

Por otro lado, se utilizó un diámetro de tubo de acrílico de 100 milímetros debido a que el volumen con dicho diámetro daba como resultado 7.07 litros, capacidad justa ya que se tenía pensado utilizar un volumen de 4 litros, adicionalmente se escogió dicho diámetro dado que se encontraron en diferentes locales comerciales diámetros de 100 y 150 milímetros.

9.4.2. Definición de accesorios

En este paso se definió el tipo de reactor que más se ajustaba a las necesidades del proyecto. Se concretó la configuración con respecto a las variables calculadas anteriormente y además se conectó con el ozonizador.

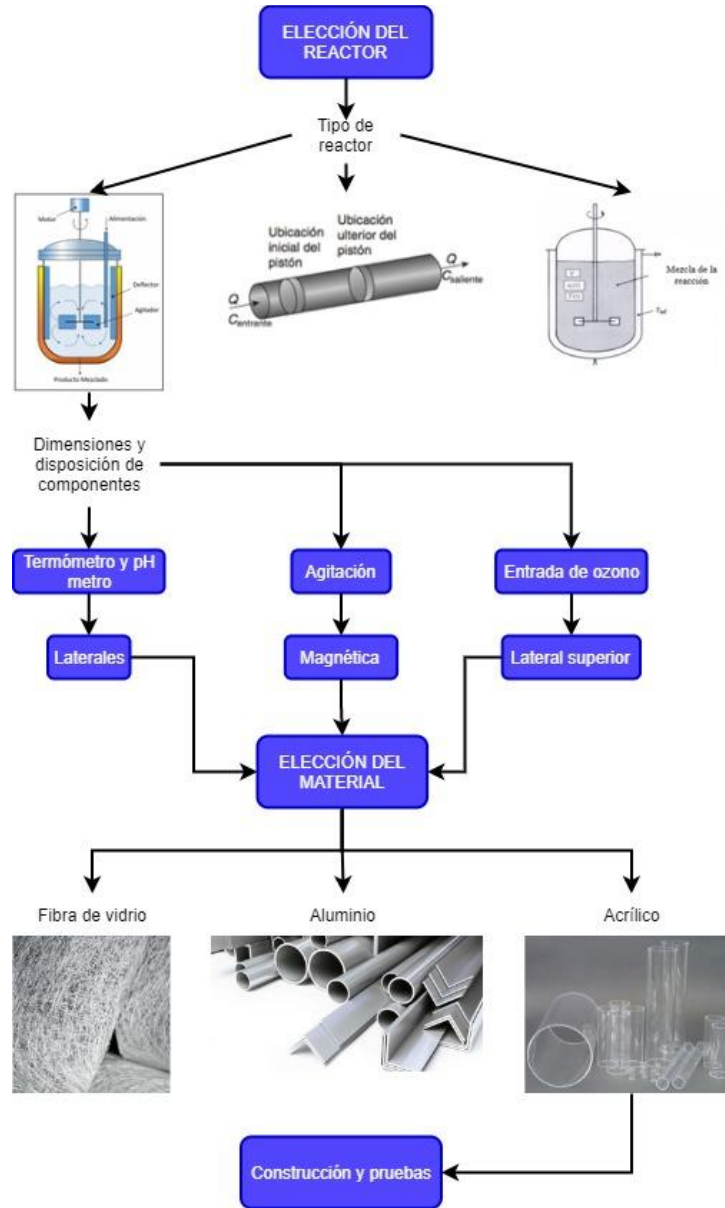


Fuente: (Lara Ramos Jose A, 2013)

9.4.3. Construcción del reactor de oxidación avanzada

Enlazando los pasos anteriores se realizó la construcción del dispositivo para su posterior evaluación de eficiencia. Se hizo una selección de materiales y equipos acorde a las necesidades propuestas por el diseño del reactor de oxidación avanzada.

Ilustración 17. Elección de reactor y material



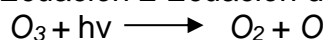
Fuente: **(Autores)**

9.5. OXIDACIÓN CON OZONO + UV

Los generadores de ozono son aparatos electrónicos que aspiran el aire del ambiente y lo pueden transformar mediante tratamientos internos y técnicas, una de las técnicas utilizadas en estos aparatos es la de placas de cerámica o tubo de cuarzo y genera ozono por medio de un efecto llamado efecto de corona. Tal efecto se basa en un proceso eléctrico en donde se ioniza el gas. “Cuando hay un arco de electricidad en un material conductor, el oxígeno que está alrededor del arco se fusiona con las moléculas de O₂ formando el ozono O₃”. (IBERISA, 2020)

La oxidación se realizó mediante una lámpara UV de 0.8 m de largo, una potencia de 40W. Los rayos UV se generan gracias a una descarga eléctrica en vapor metálico, siendo la lámpara de vapor de mercurio, la más adecuada para la creación de la radiación germicida (UV-C), gracias a que la línea de resonancia del átomo de Hg a 254nm es emitida con alta eficiencia. (AGUA, 2018)

Ecuación 2 Ecuación de reacción química Ozono + Luz UV



Fuente: **(AGUA, 2018)**

El ozono residual se canalizó mediante una manguera de 1/4” a un matraz erlenmeyer de 250ml donde se trató con yoduro de potasio (KI).

Las disoluciones de yoduro de potasio liberan yodo en presencia de ozono:

Ecuación 3 Ecuación de reacción química yoduro de potasio + ozono



Fuente: **(Portolés, 2001)**

Esta reacción puede ser utilizada para la determinación de ozono, aunque hay que tener en cuenta que otros oxidantes presentes en la atmósfera también reaccionan del mismo modo. Un papel almidonado e impregnado con una disolución de yoduro potásico, se torna azul en presencia de ozono. (Portolés, 2001)

Ilustración 18 Yoduro de potasio



Fuente: **(Autores)**

10. EVALUACION DE LA EFICIENCIA.

Se tomó como objetivo de estudio la eliminación de azul de metileno, para la evaluación del reactor y su eficiencia al realizar el tratamiento de un agua sintética mediante procesos de oxidación avanzada y la recolección de datos a diferentes intervalos de tiempo.

Para evaluar la eficiencia de remoción de un contaminante se utilizó la siguiente ecuación:

Ecuación 4 Ecuación de eficiencia

$$E = \frac{S_0 - S}{S} * 100$$

Fuente:(**PARRA RODRIGUEZ, 2006**)

Dónde:

E: Eficiencia de remoción [%]

S: Carga contaminante de salida

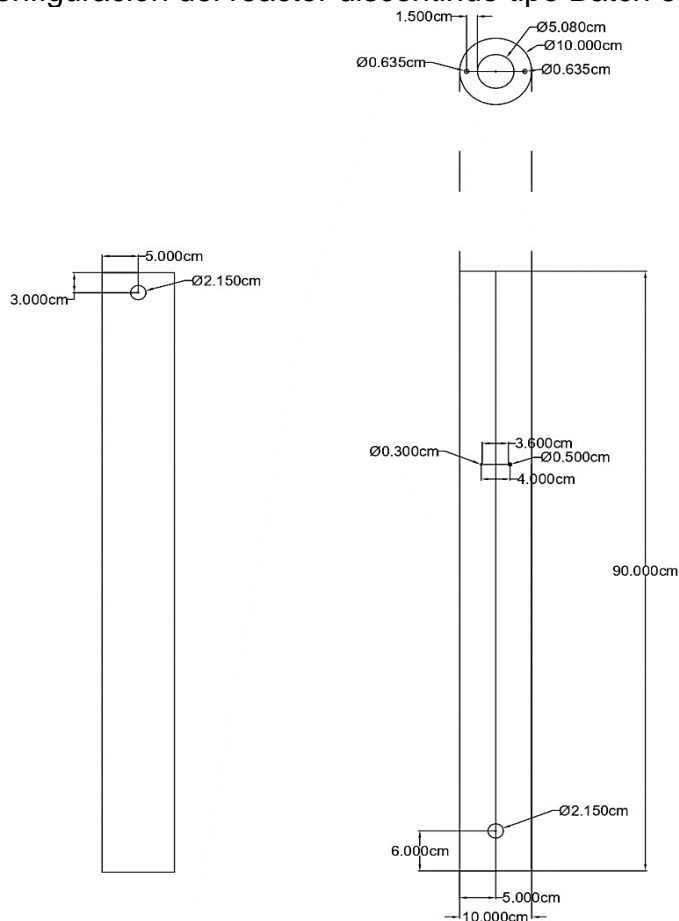
S0: Carga contaminante de entrada

11. RESULTADOS

11.1. DISEÑO REACTOR DE OXIDACIÓN AVANZADA

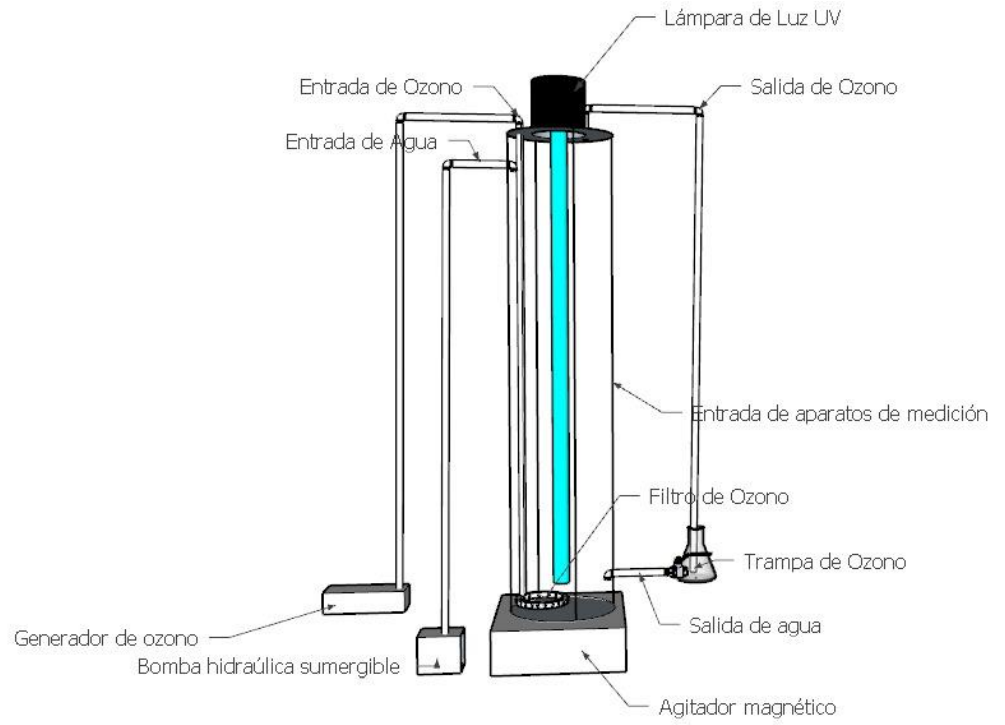
Teniendo en cuenta la disposición y medidas de la lámpara UV que fueron las variables que condicionaron la altura y volumen del tanque, se realizó su respectivo diseño en un software 2D, como se muestra en la ilustración 19, con el fin de fijar sus dimensiones, por otro lado, se simuló el montaje del reactor en un software 3D, como se muestra en la ilustración 20, con el objetivo de establecer una configuración para sus componentes.

Ilustración 19 Configuración del reactor discontinuo tipo Batch en 2D



Fuente: **(Autores)**

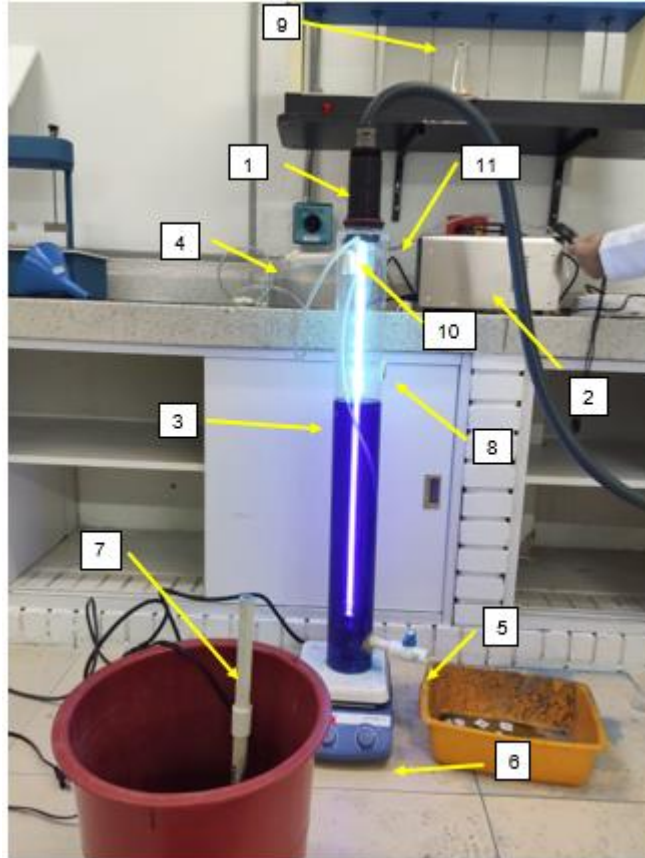
Ilustración 20 Configuración del reactor discontinuo tipo Batch en 3D



Fuente: **(Autores)**

11.2. MONTAJE DE REACTOR DE OXIDACIÓN AVANZADA

Ilustración 21 Montaje de reactor de oxidación avanzada



Fuente: **(Autores)**

Lista de componentes del montaje

1. Lámpara UV de 40W
2. Generador de Ozono
3. Cilindro del reactor
4. Entrada de agua sintética
5. Salida de agua sintética
6. Agitador magnético
7. Bomba hidráulica sumergible de 28 Watts
8. Entrada de instrumentos de medición (Termómetro y pH metro)
9. Trampa de Ozono residual
10. Entrada de ozono
11. Salida de ozono residual

En la ilustración 21 se muestra el montaje experimental del reactor de oxidación avanzada el cual está compuesto por un cilindro que tiene 90 centímetros de altura y 10 centímetros de diámetro, en su centro tiene una Lámpara UV de 40W, en sus laterales, una entrada y una salida de agua residual para la cual se utilizó tubería PVC de ½”, entrada de ozono y salida de ozono residual para la cual se utilizó manguera transparente de ¼” y la entrada de instrumentos de medición (termómetro y pH metro) además de esto el montaje está compuesto por aparatos tales como, bomba hidráulica de 28 Watts, agitador magnético y una trampa de ozono residual.

Pasos para el montaje de la Ilustración 21:

1. Conectar la bomba hidráulica sumergible al tanque por medio de la entrada de agua residual.
2. Introducir la lámpara UV en la parte superior del tanque.
3. Poner los elementos de medición, pH metro y termómetro, en las perforaciones laterales que están en el medio del tanque.
4. Conectar la entrada del ozono al generador de ozono.
5. Introducir la salida del ozono dentro del matraz erlenmeyer en la trampa de ozono.

11.3. PREPARACIÓN DE AGUA SINTÉTICA

11.3.1. DOSIFICACIÓN DE LA MUESTRA

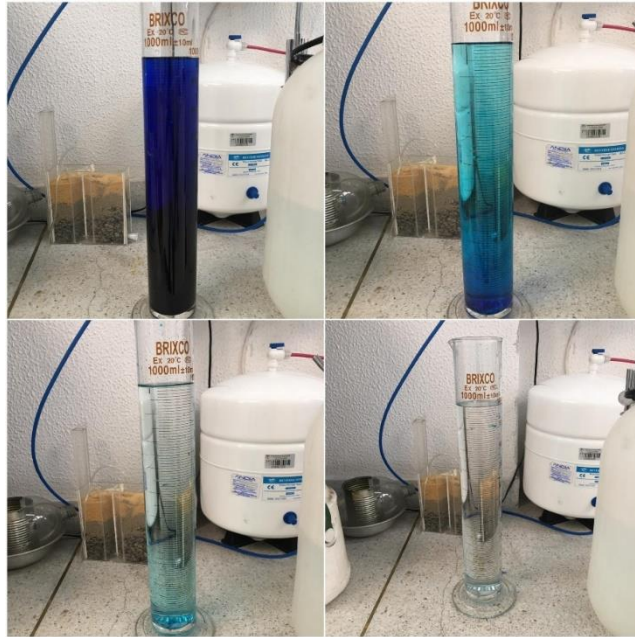
Tabla 11 Dosificación de la muestra

Dosificación de la muestra	
REACTIVOS	CANTIDAD (g/L)
Ptalato	1
Urea	1
ZnCl ₂	0.08
MgSO ₄	0.034
Azul de metileno	0.02

Fuente: **(Autores)**

Teniendo en cuenta la dosificación mostrada en la tabla 11, se realizó la preparación del agua residual sintética en dos muestras de 4 litros cada una, con agua destilada en probeta de 1 litro de capacidad como se muestra en la ilustración 22, esta dosificación fue tomada de una muestra madre para 500 mL que se encuentra en la tabla 10.

Ilustración 22 Agua residual sintética



Fuente: **(Autores)**

11.4. PRUEBAS DEL REACTOR DE OXIDACIÓN AVANZADA

Los datos se obtuvieron en un periodo de tiempo de 25 minutos para la prueba de remoción de azul de metileno con Ozono + lámpara UV y 15 minutos para la prueba de remoción de azul de metileno con lámpara UV ya que no se contaba con disponibilidad de tiempo por parte de los laboratorios de la Universidad Católica de Colombia. Teniendo en cuenta los datos arrojados por las prácticas de laboratorio de oxidación y cinética de reacción, se obtuvieron los siguientes resultados:

11.4.1. PRUEBA DE REMOCIÓN DE AZUL DE METILENO CON OZONO + LÁMPARA UV (PH Y TEMPERATURA)

En la tabla 12 se dan a conocer los resultados de pH y temperatura de la Prueba de remoción de azul de metileno con Ozono + lámpara UV

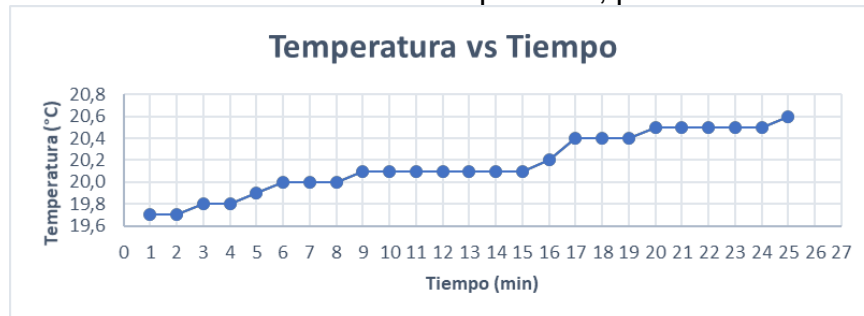
Tabla 12 Datos de pH y temperatura prueba de remoción de azul de metileno con Ozono + lámpara UV

Tiempo (min)	Prueba con Ozono+ lámpara UV	
	Temperatura °C	pH
1	19,7	4,81
2	19,7	4,81
3	19,8	4,80
4	19,8	4,80
5	19,9	4,79
6	20,0	4,79
7	20,0	4,79
8	20,0	4,78
9	20,1	4,78
10	20,1	4,78
11	20,1	4,78
12	20,1	4,78
13	20,1	4,71
14	20,1	4,69
15	20,1	4,67
16	20,2	4,67
17	20,4	4,65
18	20,4	4,65
19	20,4	4,65
20	20,5	4,61
21	20,5	4,60
22	20,5	4,59
23	20,5	4,58
24	20,5	4,57
25	20,6	4,55

Fuente: **(Autores)**

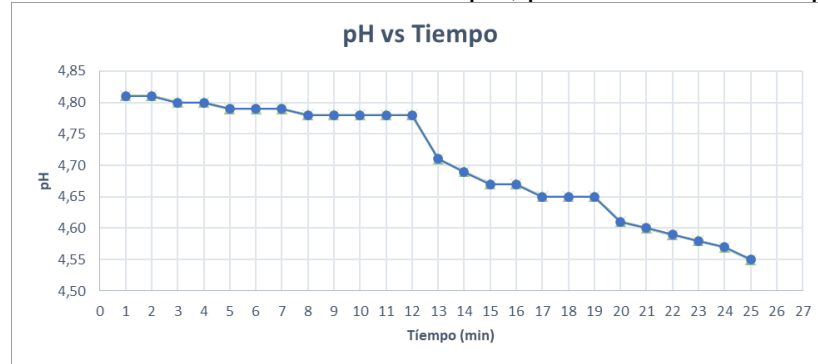
En la ilustración 23 y 24, se muestran los resultados de pH y temperatura obtenidos de la prueba de ozono + lámpara UV y prueba con lámpara UV, respectivamente, cuyos datos están en la tabla 12.

Ilustración 23 Gráfico de resultados de temperatura, prueba ozono + lámpara UV



Fuente: **(Autores)**

Ilustración 24 Gráfico de resultados de pH, prueba ozono + lámpara UV



Fuente: **(Autores)**

11.4.2. PRUEBA DE REMOCIÓN DE AZUL DE METILENO CON LÁMPARA UV (PH Y TEMPERATURA)

En la tabla 13 se dan a conocer los resultados de pH y temperatura de la prueba de remoción de azul de metileno con lámpara UV.

Tabla 13 Datos de pH y temperatura de prueba de remoción de azul de metileno con lámpara UV

DATOS DE TEMPERATURA Y pH DE LA MUESTRA DE AGUA SINTETICA		
Tiempo (min)	Prueba con lampara UV	
	Temperatura °C	pH
1	19,7	4,81
2	19,7	4,81
3	20,0	4,81
4	20,0	4,81
5	20,0	4,81
6	20,0	4,81
7	20,2	4,81
8	20,2	4,81
9	20,3	4,80
10	20,4	4,80
11	20,4	4,80
12	20,4	4,80
13	20,4	4,80
14	20,5	4,80
15	20,5	4,80

Fuente: **(Autores)**

En la ilustración 25 y 26, se muestran los resultados de pH y temperatura obtenidos de la prueba de ozono + lámpara UV y prueba con lámpara UV, respectivamente, cuyos datos están en la tabla 13.

Ilustración 25 Gráfico de resultados de temperatura, prueba lámpara UV



Fuente: **(Autores)**

Ilustración 26 Gráfico de resultados de pH, prueba lámpara UV



Fuente: **(Autores)**

11.4.2.1. Prueba de remoción de azul de metileno con Ozono + lámpara UV y Prueba de remoción de azul de metileno con lámpara UV (Absorbancia)

En las tablas 14 y 15 se dan a conocer los resultados absorbancia de la prueba de remoción de azul de metileno con Ozono + lámpara UV y prueba de remoción de azul de metileno con lámpara UV

Tabla 14 Datos de absorbancia prueba ozono y lámpara UV

Prueba con Ozono + Lámpara UV	
Tiempo (min)	Absorbancia
1	3,309
2	3,256
3	3,275
4	3,260
5	3,206
6	3,208
7	3,151
8	3,155
9	3,092
10	3,027
11	3,022
12	3,013
13	2,968
14	2,951
15	2,934
16	2,893
17	2,851
18	2,804
19	2,752
20	2,670
21	2,659
22	2,579
23	2,557
24	2,457
25	2,434

Fuente: (***Autores***)

Tabla 15 Datos de absorbancia prueba con Lámpara UV

Prueba con Lámpara UV	
Tiempo (min)	Absorbancia
1	3,238
2	3,247
3	3,221
4	3,225
5	3,239
6	3,231
7	3,226
8	3,22
9	3,217
10	3,234
11	3,216
12	3,22
13	3,235
14	3,224
15	3,205

Fuente: **(Autores)**

Nota: La absorbancia fue medida con una longitud de onda de 663 nanómetros en el espectrofotómetro.

En la ilustración 27 y 28, se muestran los resultados obtenidos de absorbancia de la prueba de ozono + lámpara UV y prueba con lámpara UV, respectivamente, cuyos datos están en las tablas 14 y 15.

Ilustración 27 Gráficos de resultados de absorbancia, prueba Ozono + lampara UV



Fuente: **(Autores)**

Ilustración 28 Gráficos de resultados de absorbancia, prueba lampara UV



Fuente: **(Autores)**

12. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL REACTOR DE OXIDACIÓN AVANZADA

Teniendo en cuenta la ecuación 4, se realizó la evaluación de la eficiencia del reactor.

Ecuación 5 Ecuación de eficiencia

$$E = \frac{S_0 - S}{S} * 100$$

Fuente: (PARRA RODRIGUEZ, 2006)

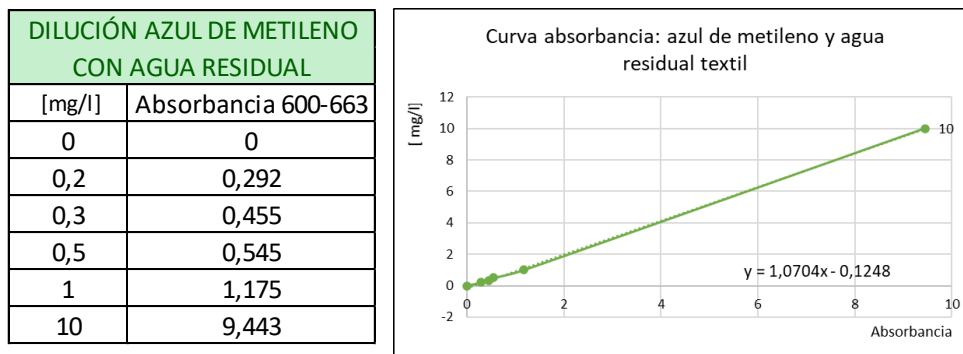
Dónde:

E: Eficiencia de remoción [%]

S: Carga contaminante de salida

S0: Carga contaminante de entrada

Ilustración 29 Curva de calibración



Fuente: **(Autores)**

Para lograr evaluar la eficiencia del reactor se tuvo que utilizar la curva de calibración mostrada en la ilustración 29 con el fin de realizar una conversión entre absorbancia y concentración de la muestra.

12.1. Prueba de remoción de azul de metileno con Ozono + lámpara UV

Teniendo en cuenta los datos de prueba de remoción de azul de metileno con Ozono + lámpara UV presentados en la tabla 14 y la ilustración 29 se realizó la conversión entre absorbancia y concentración de la muestra.

Tabla 16 Conversión de absorbancia a concentración, prueba con Ozono + lámpara UV

Prueba con Ozono + Lámpara UV	
Absorbancia	Concentración (mg/L)
3,309	3,41
3,256	3,36
3,275	3,38
3,260	3,36
3,206	3,30
3,208	3,31
3,151	3,24
3,155	3,25
3,092	3,18
3,027	3,11
3,022	3,11
3,013	3,10
2,968	3,05
2,951	3,03
2,934	3,01
2,893	2,97
2,851	2,92
2,804	2,87
2,752	2,82
2,670	2,73
2,659	2,72
2,579	2,63
2,557	2,61
2,457	2,50
2,434	2,48

Fuente: **(Autores)**

Teniendo en cuenta la ecuación 4 y los datos de la tabla 16, se realizó la evaluación de la eficiencia del reactor en la prueba de remoción de azul de metileno con Ozono + lámpara UV

$$\begin{aligned}
 S_0 &= 3,41 \text{ mg/L} \\
 S &= 2,48 \text{ mg/L} \\
 E &= \frac{3,41 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 2,48 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{2,48 \text{ mg/L}} = 38\%
 \end{aligned}$$

En la prueba de remoción de azul de metileno con Ozono + lámpara UV se obtiene una eficiencia de 38%.

12.2. Prueba de remoción de azul de metileno con lámpara UV

Teniendo en cuenta los datos de prueba de remoción de azul de metileno lámpara UV presentados en la tabla 15 y la ilustración 29 se realizó la conversión entre absorbancia y concentración de la muestra.

Tabla 17 Conversión de absorbancia a concentración, prueba con lámpara UV

Prueba con Lámpara UV	
Absorbancia	Concentración (mg/L)
3,238	3,34
3,247	3,35
3,221	3,32
3,225	3,32
3,239	3,34
3,231	3,33
3,226	3,32
3,22	3,32
3,217	3,32
3,234	3,33
3,216	3,31
3,22	3,32
3,235	3,33
3,224	3,32
3,205	3,30

Fuente: **(Autores)**

Teniendo en cuenta la ecuación 4 y los datos presentados en la tabla 17, se realizó la evaluación de la eficiencia del reactor en la prueba de remoción de azul de metileno con lámpara UV

$$S_o = 3,41 \text{ mg/L}$$

$$S = 3,30 \text{ mg/L}$$

$$E = \frac{3,41 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 3,30 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{3,30 \text{ mg/L}} = 3,3\%$$

En la prueba de remoción de azul de metileno con lámpara UV se obtiene una eficiencia igual de 3,3%.

12.3. TRAMPA DE OZONO

Por medio de un cambio de coloración en la solución de yoduro de potasio como se muestra en la ilustración 30, se evidenció el correcto tratamiento del ozono residual a través de la trampa de ozono.

Ilustración 30 Trampa de ozono



Fuente: **(Autores)**

Nota: Se utilizó para separar las moléculas Ozono (O_3) en moléculas de oxígeno (O_2) y ser amigable con el medio ambiente y las personas alrededor.

13. DISCUSION DE RESULTADOS

Al cabo de terminar las pruebas de laboratorio, y haber realizado la toma de resultados y su respectiva evaluación, se plantean posibles causas por las cuales se obtuvieron los resultados:

13.1. PRUEBA DE OZONO + LUZ UV

Con respecto a la ilustración 23 gráfico de resultados de temperatura de esta prueba, se menciona que dichos efectos son productos de una liberación de energía ya que se genera una reacción exotérmica, que aumenta gradualmente la temperatura a través del tiempo.

En relación a la ilustración 24 gráfico de resultados de pH de esta prueba, donde se evidencia que la descomposición del ozono genera una disminución del pH, lo que a su vez hace que lo lleve a un valor ácido.

Teniendo en cuenta la ilustración 27 gráfico de resultados de absorbancia, se evidencia la disminución de dicho valor debido a la degradación del azul de metileno efecto realizado por la acción del ozono y la radiación de la luz UV.

13.2. PRUEBA DE LUZ UV

Referente a la ilustración 25 gráfico de resultados de temperatura, se evidencia un aumento de dicho valor debido a la exposición del líquido a la luz UV que a su vez genera una reacción exotérmica, pero de menor magnitud a la prueba anterior.

Con relación a la ilustración 26 gráfico de resultados de pH, se presenta una disminución de dicho valor, pero en menor medida a los datos arrojados en la prueba donde se combinan las dos técnicas.

Partiendo de la ilustración 28 gráfico de resultados de absorbancia, no se evidencia una disminución constante debido a que hay un comportamiento irregular, esto puede ser gracias a un sistema de agitación poco eficiente y a la baja degradación del azul de metileno por la acción de la luz UV.

13.3. RELACIÓN ENTRE PH, ABSORBANCIA Y TEMPERATURA

La relación entre el pH y la temperatura es inversamente proporcional, en donde el aumento de la temperatura tiene como consecuencia la disminución del valor del pH, demostrado en las pruebas realizadas en los laboratorios.

El pH afecta directamente la concentración, debido a la ilustración 29 curva de calibración, la cual se usó para la conversión de datos de absorbancia a datos de concentración, en donde se ve afectada directamente los valores de absorbancia.

En relación a los datos obtenidos y el comportamiento entre las variables, se hace un análisis directo entre dichas propiedades del agua en cuestión, en donde un aumento en la temperatura se ve reflejado en una disminución del pH y este a su vez genera un descenso en los valores de absorbancia por medio de la concentración del azul de metileno.

13.4. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL REACTOR

En la prueba de remoción de azul de metileno con ozono y luz UV se obtuvo un porcentaje de eficiencia de 38% en 25 minutos esto puede ser explicado por medio de que la aplicación de estos métodos genera un aumento de radicales hidroxilos lo produce una mayor degradación de azul de metileno.

Con respecto a la prueba de remoción de azul de metileno con luz UV se obtuvieron resultados un poco desfavorables, debido a que la eficiencia del reactor aplicando dicha técnica fue del 3,3% en 15 minutos, siendo mucho menor a la prueba con las dos técnicas aplicadas. Estos resultados obtenidos se vieron afectados gracias a que luz UV tiene mayor eficiencia en la eliminación de agentes patógenos.

14. RECOMENDACIONES

Para el diseño y puesta en práctica del reactor se tienen las siguientes recomendaciones obtenidas a partir de las practicas realizadas, esto con el fin de realizar mejoras al aparato para optimizar su funcionamiento y obtener mejores resultados.

14.1. DISEÑO

14.1.1. Se deberá colocar válvulas a la entrada y salida de ozono en el reactor, con el objetivo de tener un control a la hora de detener el flujo de este gas y evitar posibles fugas que pueden entorpecer las practicas, interferir en la toma de datos, ocasionar daños al medio ambiente y a las personas que lo manipulan.

14.1.2. Los orificios que fueron diseñados para la ubicación del termómetro y pH metro, no se deberán realizar en el tanque del reactor ya que al momento de tomar muestras el volumen disminuye y llegará un punto donde no se podrán obtener los datos de los aparatos de medición, por lo cual es recomendable no hacer dichos orificios y tomar las mediciones directamente de las muestras.

14.1.3. La salida del agua sintética se puede configurar en una posición inferior a la planteada esto con el fin facilitar la evacuación del volumen contenido del tanque y así facilitar la toma de muestras.

14.1.4. El orificio superior donde está ubicada la lámpara UV debe ser realizado con mayor exactitud en sus medidas con el fin de evitar un posible escape del gas que puede interferir con los resultados y generar daños a las personas que lo manipulan, además, esto puede mejorar la estabilidad del reactor en general, por otro lado, esto mantendrá la ortogonalidad del bombillo de lámpara UV.

14.1.5. Utilizar un tipo de sistema de agitación diferente a la agitación magnética para el mezclado uniforme del agua residual sintética.

14.1.6. Con el objetico de impedir la fuga de ozono por la entrada del agua residual sintética, se deberá instalar una válvula de bola o cualquier otro tipo de válvula que impida el paso de ozono por esta tubería.

14.1.7. Diseñar una estructura de apoyo que sostenga el tanque del reactor para generar estabilidad al montaje en cuestión.

14.1.8. Tener en cuenta los diámetros comerciales de cilindro de acrílico que son 10 y 15 centímetros puesto que al querer realizar un diseño en un tamaño en específico su costo se puede incrementar.

14.2. PRÁCTICAS DE LABORATORIO

14.2.1. Por la situación actual, se recomienda realizar una mejor evaluación de tiempos teniendo en cuenta posibles retrasos que se pueden generar, esto con el fin de poder tener una cantidad optima de prácticas.

14.2.2. Teniendo en cuenta que el proceso de degradación es extenso, se recomienda tener disponibilidad en los laboratorios de más de 2 horas.

14.3. TOMA DE DATOS

14.3.1. Se recomienda realizar la toma de datos con un tiempo mayor a 1 minuto, con la finalidad de percibir con mayor detalle los cambios que produce la degradación de los compuestos contaminantes.

14.3.2. Tener una mejor disposición de recipientes para la toma de las muestras.

15. CONCLUSIONES

- Las variables de diseño que se identificaron con respecto a la configuración geométrica del tanque del reactor, específicamente a la altura del mismo que estaba restringida por la longitud del bombillo de la lámpara UV al igual que su orientación, además, el tamaño de los elementos de conducción de la entrada y salida del gas y el líquido puesto que son importantes para la facilidad al momento de la toma de datos y su respectivo montaje.
- La forma del tanque del reactor es cilíndrica con el fin de obtener una agitación uniforme en todo su volumen y evitar zonas muertas.
- El reactor discontinuo tipo batch se eligió debido a que es un recipiente con agitación constante donde la reacción se produce al momento de cargar los reactivos y nos proporciona muestras en un intervalo de tiempo que nos permitió evaluar su eficiencia y datos paralelos a este como pH y temperatura.
- Se evidenció que la absorbancia en las pruebas con ozono/lámpara UV y lámpara UV disminuía a través del tiempo debido a que por medio de estos procesos se lograba la degradación del azul de metileno y a su vez la disminución de la concentración del reactivo y mostrando mejores resultados el método de ozono/lámpara UV con una eficiencia del 38% en 25 minutos.
- Teniendo en cuenta la disminución del pH y el aumento de la temperatura, se determinó que la descomposición del O_3 generaba la disminución del pH conduciendo al mismo a un valor ácido donde el aumento de radicales hidroxilos produce una mayor degradación de azul de metileno y a su vez un aumento de temperatura.
- En conclusión, los objetivos planteados fueron cumplidos satisfactoriamente por medio del desarrollo del presente trabajo de investigación.

16. REFERENCIAS

- : Lobna Mansouri, C. T.-U. (2018). : *A comparative study on ozone, hydrogen peroxide and UV based advanced oxidation processes for efficient removal of diethyl phthalate in water.*
- agua, F. c. (2016). *La dureza del agua.*
- AGUA, L. S. (27 de junio de 2018). *DOCPLAYER*. Obtenido de OXIDACIÓN UV PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y DE PROCESO DEL SECTOR QUÍMICO Y FARMACÉUTICO:
<https://docplayer.es/23345006-Oxidacion-uv-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales-y-de-proceso-del-sector-quimico-y-farmaceutico.html>
- Ainhoa Rubio Clemente, E. L. (2013). *Procesos de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de contaminantes orgánicos emergentes.* Medellín .
- Anada Tiéga, A. D. (2010). Guia de buenas practicas. En *Agua potable, diversidad biológica y desarrollo* (pág. 6). Jacqueline Grekin y Kieran Noonan-Mooney (SCBD).
- ANAHÍ LISBETH MOSQUERA SOLÍS, R. A. (2017). “*REDISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN DE UN REACTOR DISCONTINUO DIDÁCTICO DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS, PARA LA OBTENCIÓN DE CRISTALES DE FOSFATO TRISÓDICO*”. Guayaquil.
- Antonio Rodríguez Fernández-Alba, P. L. (s.f.). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales.* España.
- Castro Peña Laura, D. H. (Junio de 2014). Degradación y decoloración de agua. Costa Rica.
- Catalunya, G. d. (7 de julio de 2015). *¿Qué son los COP?* Recuperado el 9 de septiemrbe de 2020, de
http://mediambient.gencat.cat/es/05_ambits_dactuacio/empresa_i_produccio_sostenible/substancias_quimiques/contaminants_organics_persistents_cop/que_son_els_cop/
- CUNDINAMARCA, C. (2018). *CUÁLES SON LOS PRINCIPALES PROBLEMAS DEL RÍO BOGOTÁ.* Recuperado el 24 de Agosto de 2020, de
https://www.car.gov.co/rio_bogota/vercontenido/5#:~:text=La%20tala%20de%20%C3%A1rboles%2C%20las,convierten%20en%20un%20referente%20de
- David. (1 de Mayo de 2017). *911Metallurgist*. Obtenido de
<https://www.911metallurgist.com/metallurgia/adsorcion-carbon-activado/>
- Erkan, H. S. (2020). Performance evaluation of conventional membrane bioreactor and moving. *Journal of Water Process Engineering*, 2.
- Estocolmo, C. d. (2001). *Convenio de Estocolmo.* Estocolmo.
- Experimentos científicos.* (1 de Abril de 2017). Obtenido de
<https://www.experimentoscientificos.es/ph/escala-del-ph/>
- Forero Jorge Enrique, O. O. (2005). Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de


- refinería. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 3(1), 1.
- Francesco Montecchio, M. A. (2019). *Fluid dynamics modelling of UV reactors in advanced oxidation processes for VOC abatement applications*. Estocolmo : ELSEVIER.
- Freytez Estefania, M. A. (2018). Diseño, construcción y evaluación del desempeño de un reactor de carga secuencial para tratamiento de aguas residuales de tenerías. Carabobo:
<https://www.redalyc.org/jatsRepo/707/70758484006/html/index.html>.
- IBERISA. (27 de septiembre de 2020). *IBERISA*. Obtenido de <https://iberisasl.com/generadores-de-ozono/>
- Instituto de Hidrología, M. y. (2006). *CONDUCTIVIDAD ELECTRICA POR EL MÉTODO ELECTROMÉTRICO EN AGUAS*.
- Lara Ramos Jose A, S. G. (2013). *Intensification of the O3/TiO2/UV advanced oxidation process*.
- Lenntech. (14 de Abril de 2014). *Lenntech*. Obtenido de Nanofiltración:
<https://www.lenntech.es/faq-contaminacion-agua.htm#ixzz6b57USZta>
- MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL MINISTERIO DE AMBIENTE, V. Y. (2007). *RESOLUCIÓN NÚMERO 2115 (22 JUN 2007)*. Bogotá D.C.
- Miriam Janet Gil, A. M. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción + Limpia* , 54.
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos*. Ciudad de México: Pearson.
- MUNDIAL, B. (9 de 2017). *BANCO MUNDIAL*. Obtenido de GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS:
<https://www.bancomundial.org/es/topic/waterresourcesmanagement>
- Muñoz Ortiz Carlos Eduardo, R. C. (Marzo de 2014). Combinación de procesos de oxidación. Bogotá, Colombia.
- Nieves Abril Díaz, J. A. (2018). Espectrofometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas.
- Pack, T. (s.f.). *Procesos de filtración*. Obtenido de <https://www.tetrapak.com/es/solutions/processing/main-technology-area/membrane-filtration/filtration-processes>
- PARRA RODRIGUEZ, L. M. (2006). *OPERACIÓN DE UN FILTRO ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (FAFA)*. Manizales .
- Pérez, G. R. (2012). En *Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua* (pág. 23). Bogotá.
- Pinos Verónica, A. A. (s.f.). *PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADA UTILIZANDO*. Cuenca, Ecuador.
- Portolés, J. J. (2001). *EL OZONO ATMOSFÉRICO, ¿BENEFactor O MALHECHOR?* València - España.
- purificación, L. T. (28 de Septiembre de 2009). *Micro y ultra filtración*. Obtenido de <https://www.lenntech.es/micro-y-ultra-filtracion.htm>
- Ramirez, C. A. (2011). En *Calidad del agua, evaluacion y diagnostico* (pág. 60). Medellín.
- Remtavares. (1 de 12 de 2006). *madri+d*. Obtenido de

- <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2006/12/01/53336>
- Salud, O. M. (2015). *Agua, saneamiento e higiene*. Obtenido de https://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/jmp-2015-key-facts/es/
- Salud, O. M. (14 de junio de 2019). *Agua*. Recuperado el 3 de septiembre de 2020, de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water#>
- Santos Altés, A. (31 de 10 de 2018). *iAgua*. Obtenido de Reducción DQO & DBO. Aguas residuales: <https://www.iagua.es/blogs/alejandro-santos-altés/reduccion-dqo-dbo-aguas-residuales#:~:text=La%20demanda%20qu%C3%ADmica%20de%20oxígeno,los%20recursos%20naturales%20de%20esta>
- Sarai Bes Monge, D. A. (s.f.). *Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales*. Recuperado el 1 de 9 de 2020, de http://www.cytod.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidaciones_avanzadas_0.pdf
- Solíz, M. C. (2016). "ESTUDIO DE LA. Barcelona.
- SOSTENIBLE, M. D. (s.f.). *MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=407:plantilla-gestion-integral-del-recurso-hidrico-14>
- Soto, J. C. (2017). *Equipo de remoción de contaminantes orgánicos persistentes para aplicación en la potabilización de aguas*. Cali.
- Torices, D. P. (2018). PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA: AVANCES RECIENTES Y TENDENCIAS FUTURAS . Cantabria.
- ULLOA, J. C. (2017). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR HIBRIDO TIPO BATCH. Nuevo León.
- UNESCO. (2009). *Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP)*. Recuperado el 25 de Agosto de 2020, de <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-15-water-pollution/#:~:text=La%20contaminaci%C3%B3n%20del%20agua%20sigue%20creciendo%20a%20nivel%20mundial&text=Generalmente%2C%20los%20contaminant>
- UNESCO. (2015). Abordar la escasez y la calidad del agua.
- UNESCO. (2017). *AGUAS RESIDUALES EL RECURSO DESAPROVECHADO*. París.
- UNIDAS, N. (2020). *NACIONES UNIDAS*. Obtenido de <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/water/index.html>
- Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. (s.f.). *ANÁLISIS DE AGUAS*. Tunja.
- Vázquez, J. C. (2002). Evaluación analítica y optimización de técnicas de procesos

de oxidación avanzada en planta piloto . Almeria.
Veracruzana, U. (23 de Octubre de 2020). *Reactor de flujo pistón*. Obtenido de <https://sites.google.com/site/bioingenieriauv15/unidad-2-biorreactores-y-su-aplicacion/2-3-reactor-de-flujo-piston>
Wikiwand. (28 de Noviembre de 2015). *Wikiwand, Procesos de oxidación avanzada*. Obtenido de https://www.wikiwand.com/es/Procesos_de_oxidaci%C3%B3n_avanzada
Zamora, J. R. (8 de Septiembre de 2009). *Parámetros fisicoquímicos de dureza total en calcio y magnesio, pH, conductividad y temperatura del agua potable analizados en conjunto con las Asociaciones Administradoras del Acueducto, (ASADAS), de cada distrito de Grecia, cantón de Alajuela. Costa Rica.*

17. ANEXOS

Anexo 1. Programación de laboratorios

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA LABORATORIOS	FORMATO DE SOLICITUD Y PROGRAMACIÓN DE TIEMPO DE LABORATORIO DEDICADO A PRACTICA NO ASISTIDA (LIBRE)	F 053 LI 103 02
---	---	-----------------

NOMBRE DE LA ASIGNATURA/PROYECTO DE INVESTIGACIÓN/SEMILLERO DE INVESTIGACIÓN/TRABAJO DE GRADO QUE SUSTENTA LA SOLICITUD DE TIEMPO DE LABORATORIO: DISEÑO Y MONTAJE DE UN REACTOR DE OXIDACIÓN AVANZADA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

IDENTIFICACIÓN DE LOS SOLICITANTES DE TIEMPO DE LABORATORIO:			
CÓDIGO	NOMBRES Y APELLIDOS	E-MAIL @ucatolica.edu.co	TELÉFONO
507260	Brayan Estiben Huertas Martínez	behuertas60@ucatolica.edu.co	3115506072
507181	Steven Velásquez Trigos	svelasquez81@ucatolica.edu.co	3213362046
1143331542	Wilfredo Marimon Bolívar	wmarimon@ucatolica.edu.co	3008297875

PROGRAMACIÓN DE ACTIVIDAD(ES) POR TIEMPO DE LABORATORIO SOLICITADO:								
ID	HORARIO IDEAL			HORARIO OPCIONAL			ESPACIO SOLICITADO ⁽²⁾ (A-B-C-D-E)	ENSAYO(S) A REALIZAR EN CADA LAPSO
	FECHA (dd/mm/AA)	HORA INICIO ⁽¹⁾ (HH:MM)	HORA FIN ⁽¹⁾ (HH:MM)	FECHA (dd/mm/AA)	HORA INICIO ⁽¹⁾ (HH:MM)	HORA FIN ⁽¹⁾ (HH:MM)		
1	24/02/2021	14:00	16:00	24/02/2021	11:00	13:00	D	Reconocimiento del lugar de trabajo y equipos
2	07/04/2021	14:00	16:00	07/04/2021	11:00	13:00	D	Preparación de solución
3	14/04/2021	14:00	16:00	14/04/2021	11:00	13:00	D	Ensayo de oxidación
4	21/04/2021	14:00	16:00	21/04/2021	11:00	13:00	D	Cinética de reacción
5	26/05/2021	14:00	16:00	26/04/2021	11:00	13:00	D	Cinética de reacción 2

⁽¹⁾ Cada lapso solicitado será máximo de 2 HORAS por día. Por favor, asistir con puntualidad para mayor optimización del tiempo.

⁽²⁾ A) Mecánica de suelos. B) Concretos. C) Mecánica de Sólidos. D) Análisis de agua. E) Hidráulica

MATERIALES /EQUIPOS/ INSUMOS A USAR	UND	CANT	A CARGO:	
			LAB	USU
Espectrofotómetro		1	x	
PH metro		1	x	
Recipientes de medición		5	x	
Termómetro		1	x	
Generador de ozono		1	x	
Lámpara UV		1	x	
Balanza		1	x	
Yoduro de Potasio	Mg/L			x
Plata	Mg/L		x	
Úrea	Mg/L		x	
MgSO ₄	Mg/L		x	
ZnCl ₂	Mg/L		x	
Azul de metileno	Mg/L		x	

OBSERVACIONES

Se utilizará vidriería y equipos de proyectos de investigación asociados a trabajo de grado

Entiendo que debo diligenciar completamente esta solicitud y que su aprobación me obliga a cumplir a cabalidad con el "Reglamento de los laboratorios" de la FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA y a acatar las órdenes que se impartan por parte del personal docente y administrativo. Los elementos de protección personal serán de mi propiedad. También me comprometo con el uso eficiente del horario asignado: asistir, informar la no asistencia (por lo menos con un día hábil de anticipación).