

ESTUDIO DE CICLO DE VIDA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN REACTOR DE
OXIDACIÓN AVANZADA PARA TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL TEXTIL



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

AUTORA

CINDY PAOLA RINCÓN BERMUDEZ

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2020**

**ESTUDIO DE CICLO DE VIDA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN REACTOR
DE OXIDACIÓN AVANZADA PARA TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL
TEXTIL**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

AUTORA

CINDY PAOLA RINCÓN BERMUDEZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera civil

DIRECTOR

PhD. Wilfredo Marimón Bolívar

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2020**



Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 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

Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material

La licenciente 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 licenciente.



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



CompartirIgual — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la [misma licencia](#) del original.

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 director

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. de 2020

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, le doy las gracias a DIOS que siempre ha sido mi motor y mi mayor fuerza para seguir adelante y me permitió poder culminar mi trabajo de grado.

Doy infinitas gracias a mi asesor de trabajo de grado el Ingeniero Wilfredo Marimón Bolívar, por su paciencia y dedicación para estar al tanto de todo mi trabajo, por estar siempre presto atender todas mis dudas, y siempre responder de la forma más cordial, Gracias por la excelente orientación que hoy me permiten culminar mi trabajo de grado.

Agradezco a mi familia, a mi esposo por apoyarme, por estar a mi lado en los momentos de arduo trabajo, a mis padres por la motivación diaria, a mi hijo por comprender cuando no podía jugar con él, y a mis hermanas por la ayuda que me brindaron.

A los docentes que me brindaron cada tutoría y resolvieron cada duda que surgía a lo largo del desarrollo de mi trabajo de grado, a la Universidad por este camino de aprendizajes a lo largo de mi carrera que aportaron un granito de arena a la enseñanza que hoy me han servido para ser en un futuro muy cercano una gran ingeniera civil, y que espera aportar grandes cosas en su vida laboral.

DEDICATORIA

Quiero dedicarle esta tesis en primer lugar a papito Dios, ya que él siempre ha sido para mí lo más importante en mi vida, todo lo que he logrado hasta el día de hoy no hubiera sido posible sin la voluntad de él.

A mi familia, a mi padre que siempre se ha esmerado por verme triunfar en mi vida, y que siempre quiso verme con mi título universitario, a mi madre porque sin sus consejos no hubiera logrado llegar hasta donde he llegado hoy, mi esposo que me ha acompañado en este largo viaje y me ha dado todo su apoyo y en mis momentos que siento que no puedo seguir él está con una palabra de aliento para mí, a mi hijo porque por él es que hago cada esfuerzo día a día, mis hermanas y demás familiares cercanos por todo el apoyo.

A todos mis compañeros que me han acompañado a lo largo de toda mi carrera y que han aportado algo a mi vida, les dedico esta tesis, junto con una palabra de ánimo para que no se rindan a lo largo del camino, que este puede ser largo y cuesta, pero vale la pena.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.	12
2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.	13
3. JUSTIFICACIÓN.	15
4. ESTADO DEL ARTE.	18
5. ANTECEDENTES.	21
6. MARCO DE REFERENCIA.	22
6.1. MARCO TEÓRICO.	22
6.1.1. AGUA	22
6.1.2. CALIDAD DEL AGUA	22
6.1.3. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS	23
6.1.4. INDUSTRIA TEXTIL	27
6.1.5. CONTAMINACIÓN A LAS AGUAS POR LA INDUSTRIA TEXTIL	27
6.1.6. AGUAS RESIDUALES	28
6.1.7. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.	29
6.1.8. OXIDACIÓN AVANZADA	32
6.1.8.1. Procesos utilizados.	32
6.1.9. REACTORES DE OXIDACIÓN AVANZADA	33
6.1.9.1. Clasificación de los reactores.	34
6.1.10. BALANCE DE MASA Y ENERGÍA	35
6.1.10.1. Balance de masa	35
6.1.11. CICLO DE VIDA	36
6.1.11.1. Origen del ciclo de vida (ACV)	36
6.1.11.2. Unidad Funcional del ACV	37
6.1.11.3. Metodología del ACV	37
6.1.11.4. Estructura del ACV	38
6.1.12. CATEGORÍAS DE IMPACTO AMBIENTAL EN LOS PROCESOS	39

6.1.13. SOFTWARE GABI	40
6.2. MARCO LEGAL	41
7. OBJETIVOS	43
7.1. OBJETIVO GENERAL.	43
7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	43
8. ALCANCE Y LIMITACIONES.	44
8.1. ALCANCE.	44
8.2. LIMITACIONES.	44
9. METODOLOGÍA	45
9.1. BUSQUEDA DE INFORMACIÓN	45
9.2. ESTUDIO DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA	46
9.2.1. Primer Reactor	47
9.2.2. Segundo Reactor	50
9.2.3. Tercer Reactor	54
9.3. CÁLCULOS DE LOS BALANCES DE MASA Y ENERGÍA	56
9.4. MODELACIÓN DEL SISTEMA DE ENTRADA Y SALIDA DE LOS REACTORES	57
9.5. ANALISIS DE CICLO DE VIDA	57
9.5.1. Unidad funcional	57
9.5.2. Categorías de impacto	58
10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	60
10.1. CÁLCULOS DE LOS BALANCES DE MASA.	60
10.1.1. Biorreactor de membrana	60
10.1.2. Proceso ozono – fenton	62
10.1.3. Proceso foto – fenton	66
10.1.4. Promedio	69
10.2. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS REACTORES.	71
11. EVALUACIÓN IMPACTO AMBIENTAL	74
12. CONCLUSIONES.	82
13. REFERENCIAS.	84

LISTA DE IMÁGENES.

Figura 1 Tratamiento de aguas residuales.....	30
Figura 2 Proceso tratamiento de agua.....	31
Figura 3 Estructura del ACV	39
Figura 4 Porcentaje de eliminación DQO.....	49
Figura 5 Montaje del reactor Ozono - Fenton	51
Figura 6 Entradas y salidas del proceso Ozono - fenton	52
Figura 7 Esquema del proceso Ozono - Fenton	53
Figura 8 Datos del reactor Ozono - Fenton.....	53
Figura 9 Esquema del procedimiento Foto - Fenton	55
Figura 10 Grafica potencial de calentamiento global. Reactor ozono - fenton.....	71
Figura 11 Gráfica uso del suelo. Reactor Ozono - Fenton.....	72
Figura 12 Gráfica de agotamiento del agua.....	72
Figura 13 Gráfica potencial de calentamiento global. Reactor Foto - Fenton	73
Figura 14 Grafica comparativo potencial de acidificación	74
Figura 15 Gráfica comparativo toxicidad humana.....	74
Figura 16 Gráfica comparativo Potencial de calentamiento global (GWP)	75
Figura 17 Gráfica comparativo potencial de agotamiento del ozono (ODP)	75
Figura 18 Gráfica comparativo uso del suelo.....	76
Figura 19 Gráfica comparativo potencial de eutrofización	76
Figura 20 Gráfica comparativo eutrofización marina.....	77
Figura 21 Gráfica comparativo elementos de agotamiento abióticos.....	77
Figura 22 Gráfica comparativo agotamiento de agua	78
Figura 23 Gráfica comparativo uso energético	78
Figura 24 Gráfica comparativo de los tres reactores	79

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. clasificación del nivel de riesgo y acciones según IRCA.....	22
Tabla 2 Conductividad del agua.....	23
Tabla 3 Índices del dureza del agua	24
Tabla 4 POA	33
Tabla 5 Marco legal	41
Tabla 6 Parámetros operativos	48
Tabla 7 Composición del efluente.....	48
Tabla 8 Porcentaje de eliminación SST	49
Tabla 9 Porcentaje de eliminación de color en el proceso BRM.....	50
Tabla 10 Caracterización de agua proceso Ozono - Fenton.....	51
Tabla 11 Características del efluente después del tratamiento.....	52
Tabla 12 Datos del reactor Foto - fenton	54
Tabla 13 Caracterización del agua proceso Foto - Fenton	55
Tabla 14 Categorías de impacto	58
Tabla 15 Caudal del proceso BRM	60
Tabla 16 Datos de entrada del proceso BRM	60
Tabla 17 Carga másica de entrada del proceso BRM	61
Tabla 18 Datos de salida proceso BRM.....	61
Tabla 19 Carga másica de las salidas del proceso BRM.....	61
Tabla 20 Insumos del proceso BRM	62
Tabla 21 Caudal del proceso ozono - fenton	62
Tabla 22 Datos de entrada del proceso ozono - fenton	63
Table 23 Carga másica de entrada del proceso ozono - fenton	63
Table 24 Datos de salida proceso Ozono - Fenton.....	64
Tabla 25 Carga másica de las salidas del proceso Ozono - Fenton.....	64
Tabla 26 Reactivos usados en el proceso Ozono - Fenton	64
Tabla 27 Lodo producido en el proceso Ozono - fenton	65
Tabla 28 Energía requerida del proceso Ozono - fenton	65
Tabla 29 Datos generales del reactor del proceso Ozono - Fenton.....	65
Tabla 30 Caudal del proceso Foto - fenton.....	66
Tabla 31 Datos de entrada del proceso Foto - Fenton.....	66
Table 32 Carga másica de entrada del proceso Foto - fenton	67
Tabla 33 Datos de salida proceso Foto - Fenton	67
Tabla 34 Carga másica de las salidas del proceso foto - fenton.....	68
Tabla 35 Reactivos usados en el proceso Foto - Fenton.....	68

Tabla 36 Energía requerida del proceso Foto - Fenton	68
Tabla 37 Datos generales del reactor del proceso Foto - Fenton	69
Tabla 38 Promedio del caudal de entrada	69
Tabla 39 Cálculos de reactor de membrana con caudal promedio	70
Tabla 40 Cálculos de reactor ozono - fenton con caudal promedio	70
Tabla 41 Cálculos de reactor foto - fenton con caudal promedio	70

1. INTRODUCCIÓN.

El agua es sin duda alguna el recurso natural más importante en todo el mundo, por eso se debe valorar y darle la importancia que merece. El uso de este recurso abarca los diferentes aspectos de la vida cotidiana, ya que es fundamental para las diversas actividades.

El mundo se enfrenta actualmente a los escasos de agua. Ya que muchas veces no se le da el uso adecuado, se debe mitigar todo efecto negativo que se genere en el medio ambiente o en la salud humana.

La eliminación de aguas residuales no tratadas produce impactos ambientales negativos en los cursos de agua receptores, en función de la concentración de contaminantes que dichas aguas contengan.[1] Por tal razón se debe realizar el tratamiento adecuado a las aguas residuales para darle reusó y así el impacto no sea tan severo.

Con esta investigación se quiere estudiar el impacto ambiental de la implementación de reactores de oxidación avanzada para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil, definiendo primeramente los diferentes tipos de reactores que existen, y las configuraciones de oxidación avanzada más adecuadas para tratar el agua residual de la industria textil. Realizando los balances de masa y energía de las configuraciones de los reactores seleccionados. Y así llevar a cabo un análisis de ciclo de vida de los reactores de oxidación avanzada para el tratamiento de agua residual textil por medio de un software que simulara las variables que tienen impacto ambiental en dichos procesos.

2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

El agua es la principal fuente de vida para todo ser humano, es el principal elemento que se necesita para poder subsistir en este mundo, ya que es indispensable en todo ámbito de vida.

En muchos lugares del mundo, no se cuenta con agua potable y apta para el consumo humano, países como África, India, y en Colombia en algunos lugares del país no se cuenta con el acceso de agua potable. El suministro de agua potable es fundamental para la salud, la industria y la agricultura. Según los datos del World Resources Institute (WRI) más de 1.000 millones de personas viven, en la actualidad, en regiones con escasez de agua y hasta 3.500 millones podrían sufrir escasez de agua en 2025.[2] Esto conlleva muchos problemas, entre ellos problemas de salud que se pueden tener por el consumo de agua.

En el mundo solo se cuenta con un 1% de agua potable, y aun así se ve lejos la posibilidad de que un día este recurso se agote, pero lastimosamente es lo que tienen que vivir las personas que no cuentan con este recurso. En el día a día se gasta agua en los diferentes ámbitos de la vida, no solo para las necesidades básicas, si no en industria, agricultura que es la fuente de empleo y progreso para el mundo entero. Esto es algo que no se puede cambiar, pero que se puede mitigar al tratar de buscar nuevas alternativas para darle un uso adecuado a las aguas residuales y que estas puedan ser rehusadas.

Si se tratara el tema de la escasez de agua con mucha más importancia, tal vez se pudiera darle una solución a esta problemática, el agua residual que se produce en los diferentes sectores puede tener un mejor uso ya sea en las mismas industrias o en otros sectores.

La carencia de plantas de tratamiento de aguas residuales en las industrias ocasiona grandes desechos de aguas contaminadas que generan mucho daño al ambiente, ya que la mayoría de estas aguas son descargadas en los ríos, lagos, o diferentes fuentes de agua contaminándolos.

Según la ONU la industria textil produce el 10% de las emisiones de carbono y el 20% de las aguas residuales, es la segunda industria que más contamina el planeta, las industrias textiles para sus procesos necesitan de grandes cantidades de agua para sus procesos productivos, y de estas cantidades de agua la gran mayoría termina con un alto porcentaje de contaminación, y esta agua no se puede volver a rehusar.

Estos compuestos orgánicos tienen un gran efecto en la salud tanto de las personas que tienen contacto con el agua, como en los animales que viven en los diferentes cuerpos de agua. La mayoría de los problemas en la salud son problemas intestinales, uno de ellos es por la presencia de compuestos disruptores endocrinos (CDE), farmacéuticos, algunos de estos compuestos causan serios problemas en los organismos vivos a niveles de ng. L-1 y otros, además generan resistencia en poblaciones microbianas. El término compuesto disruptor-endocrino define un conjunto diverso y heterogéneo de compuestos químicos capaces de alterar el equilibrio hormonal. [3].

Los reactores de oxidación avanzada se postulan como una buena propuesta para el tratamiento de las aguas residuales de la industria textil. Existen diversos tipos de procesos de reactores, lo que se desconoce es que impacto ambiental genera la implementación de cada uno de ellos.

En este trabajo investigativo se seleccionarán tres diferentes tipos de reactores para realizarle a cada uno de ellos un Análisis de Ciclo de vida y así poder saber que tan grande es el impacto de cada uno haciendo un comparativo entre ellos.

Conforme a la anterior problemática propuesta, acerca de los tratamientos que se les da a las aguas residuales de la industria textil. Se formula la siguiente pregunta: *¿Cuál sería la configuración más adecuada del diseño de un reactor de oxidación avanzada para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil, teniendo en cuenta el impacto ambiental en su implementación?*

3. JUSTIFICACIÓN.

La industria textil sin duda tiene gran impacto ambiental, estas tienen un alto consumo energético, la explotación de recursos naturales, Tienen una gran emisión de gases derivados de los diferentes procesos, el uso de sustancias químicas que son altamente tóxicas, también por la generación de grandes cantidades de desechos. En cada uno de los procesos de la industria textil se requieren grandes cantidades de agua, y esta agua queda con altos índices de contaminación. El aire también se ve gran afectado por la industria textil, en sus procesos se generan vapor de compuestos orgánicos los cuales se detectan en forma de niebla o en algunos casos invisible, pero con olores detectables. [4].

Esto no solo afecta el medio ambiente, sino también afecta la salud de personas y animales. En la gran mayoría de los procesos se manejan sustancias tóxicas altamente perjudiciales para la salud, los tintes que se usan mayor parte en las prendas de vestir tienen un alto contenido de contaminantes, como el antimonio, que no solo perjudica a las personas que trabajan en las fábricas en la elaboración de estos productos, y aunque estos productos se lavan, algunas concentraciones de algunas sustancias no son removidas del todo, afectando así a las personas que les den uso, en algunos casos solo se tiene una reacción alérgica en la piel, pero en otros casos el problema es mucho más serio ya que algunas de estas sustancias tienen potencial cancerígeno. [5].

Existen muchos métodos usados en la actualidad para el tratamiento de las aguas residuales en las diferentes industrias, unos más convencionales que otros, y algunos 100% eficaces, pero otros no, para el respectivo tratamiento que se le dará es importante conocer algunos factores para así mismo darle el tratamiento adecuado, se puede saber si el agua contiene metales, se puede estudiar el color, el olor, conocer si esta tiene materia orgánica disuelta, elementos químicos entre otras particularidades que se pueden encontrar y que nos puede ayudar para darle el tratamiento más adecuado. A continuación, mencionaremos algunos y las desventajas que se encuentran:

La filtración se usa mucho para tratar agua superficial para la remoción de la turbiedad color y organismos, la filtración es un sistema de fácil manejo, estos sistemas son muy eficientes para la remoción de partículas suspendidas y de flora bacteriana que lleva el agua. Una de las desventajas es que no retienen sustancias orgánicas, bacterias o metales disueltos en el agua, también con un tratamiento con filtración no se puede quitar el color que algunos compuestos químicos le dan al

agua usada en la industria textil, los sistemas de filtración requieren de un mantenimiento adecuado y frecuente. [6].

La desinfección se usa principalmente para eliminar o inactivar organismos que están en el agua como bacterias que pueden ser causantes de problemas en la salud de las personas, esto se hace por medio de desinfectantes físicos o químicos. Entre los químicos se encuentran el cloro, el ozono, fenoles, alcoholes, hipoclorito, entre otros. Y en los físicos luz ultravioleta, radiación electrónica, sonido, calor entre otros. La desinfección con ozono se usa principalmente en la industria farmacéutica, el ozono es un oxidante poderoso y agente desinfectante, algunas de sus desventajas es que el gas debe ser generado in situ y darle uso de inmediato, debido a la inestabilidad de la molécula de ozono, Tienen un costo elevado de operación. La desinfección con cloro es muy efectiva para remover patógenos microbianos, se requiere un tiempo de contacto entre el cloro y el agua para que sea más efectivo y para controlar el pH del agua. Una de las desventajas es la generación de subproductos halogenados que se producen cuando el cloro reacciona con la materia orgánica que está contenida en el agua, estos subproductos tienen índices de toxicidad para el ser humano. [7].

La desinfección por luz ultravioleta se genera con una lámpara especial, y esta no inactiva los microorganismos por vía química sino por la absorción de la luz. Esta sería una de las mayores ventajas ya que desinfecta el agua sin implementar productos químicos peligrosos, también es de bajo costo en cuanto a inversión y operación, no genera sabores ni olores como si lo hacen los desinfectantes químicos. Entre sus desventajas es que no se puede usar como un único proceso ya que este proceso tiene carencia de desinfección residual, es muy ineficiente para tratar aguas turbias con sólidos suspendidos, o materia orgánica soluble, Por esto se limita solamente a aguas claras y con bajo índice de contaminación. [7].

La filtración por membranas consiste en materiales finos capaces de separar sustancias cuando una presión es aplicada a través de ellos. Entre la filtración por membranas podemos encontrar aplicaciones como la microfiltración, la ultrafiltración, la nanofiltración y la ósmosis inversa. Todas estas aplicaciones remueven virus, bacterias, sólidos suspendidos y materia orgánica disuelta. Una de las desventajas es que su costo es muy elevado, tienen un gran desperdicio de agua y la descomposición de la membrana. [8].

La oxidación avanzada en la actualidad ha sido uno de los tratamientos que más se está implementando ya que a comparación de otros métodos convencionales esté es uno de los más eficaces y potenciales para el tratamiento de aguas residuales,

tiene por objetivo la eliminación de compuestos solubles no biodegradables, presentes en las aguas residuales, Tiene la capacidad de oxidar una gran variedad de contaminantes, pudiendo llegar a la mineralización completa. Los tiempos de reacción son muy cortos y una alta capacidad oxidante. Es posible eliminar compuestos tanto orgánicos como inorgánicos, logrando así una reducción de DQO y toxicidad en las aguas residuales tratadas. La oxidación avanzada tiene muchas ventajas de la cuales se puede resaltar, sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración como plaguicidas que se usan en las diferentes industrias. Son muy útiles para eliminar contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamientos, principalmente el biológico. Eliminan efectos sobre la salud de desinfectantes, medicamentos y oxidantes residuales como el cloro. [9].

Los catalizadores son usados en la oxidación para el tratamiento de las emisiones que contienen compuestos orgánicos volátiles. Pero estos llevan un gran problema para la separación de los catalizadores, estos procesos de separación y recuperación del medio de reacción deben ser muy eficientes, como para reducir la pérdida del catalizador, como para librarse de la contaminación de los productos y minimizar costos de producción. Cuando se trata de partículas grandes pueden ser separados por procesos de filtración, pero cuando se trata de nanopartículas la recuperación usando los métodos convencionales es ineficiente y costosa, lo que impide su uso en la industria. [10].

Mediante la aplicación de un campo magnético se solucionan los problemas de separación y recuperación del catalizador, también cabe destacar que este método tiene baja toxicidad, económico, es un procedimiento simple y amigable con el medio ambiente, que sería una gran solución para el tratamiento de aguas residuales en la industria textil. [10].

Es importante recalcar que para cualquier método de oxidación avanzada por medio del uso de reactores, se debería hacer los Análisis de Ciclo de Vida para así saber que tanto se está generando un impacto ambiental, al tener estos ACV se podría hacer un balance para escoger un método que sea eficiente pero así mismo no tenga tanto impacto ambiental.

4. ESTADO DEL ARTE.

A continuación, se presentan diferentes investigaciones en los diseños de reactores de oxidación avanzada en los procesos de tratamiento de la industria textil:

- **Una nueva metodología para evaluar el rendimiento de los AOP en muestras complejas: aplicación de la degradación de compuestos fenólicos por O₃ y O₃/UV-A - Vis**

En esta investigación se estudió una industria de procesamiento de alimentos, que producen efluentes altamente contaminados que contienen azúcares, y compuestos fenólicos en altas concentraciones en las aguas residuales originadas en los diferentes procesos. Muchos de estos compuestos son refractarios a los tratamientos convencionales, por esta razón es necesario los tratamientos alternativos para tratar el agua.

En esta investigación se estudió el proceso de ozonización, la irradiación, la fracción UV-A. La ozonización implica no solo una reacción directa del ozono molecular con el contaminante sino también un mecanismo indirecto que involucra radicales hidroxilos, El mecanismo depende del pH. La radiación también se puede emplear para generar OH a partir del ozono, el mecanismo es complejo y depende de parámetros como el pH. La fracción UV-A también se puede emplear para este propósito, aunque su eficiencia es menor que la de UVC, ya que la absorción de ozono en este intervalo es muy baja.

Esta investigación tiene dos objetivos principales, 1. Estudiar el uso de O₃ y su combinación con la luz solar simulada en la eliminación de componentes fenólicos que se encuentran comúnmente en los efluentes de procesamiento de alimentos y 2 desarrollar una metodología confiable para monitorear el desempeño de AOP en muestras complejas.

En los resultados de ozonización de los compuestos fenólicos, se mezcló 8 fenoles y polifenoles se trataron con O₃, y en general se observó una eliminación muy rápida de los contaminantes estudiados.

En conclusión, en esta investigación se probó una metodología de diseño experimental, cromatografía líquida, EEM y bioensayos y se logró una evaluación satisfactoria del proceso de descontaminación. [11].

- **Aplicación del Análisis del Ciclo de vida en el estudio ambiental de diferentes Procesos Avanzados de Oxidación**

En esta tesis doctoral el objetivo general es investigar la aplicabilidad del ACV en la evaluación ambiental de procesos químicos en el ámbito de la química verde, aplicando este a diferentes procesos de oxidación avanzada para el tratamiento de aguas residuales, para así comparar desde la perspectiva ambiental diferentes procesos químicos para determinar las etapas que generan más impacto y diseñar propuestas que mejoren este aspecto.

Entre algunas conclusiones de esta tesis se destaca que desde el punto ambiental el proceso foto – fenton como el menos impactante entre los que estaban incluidos en los estudios. El proceso de fotocátalisis heterogénea es el que presenta mayor impacto ambiental entre los procesos de oxidación avanzada analizados, el principal impacto ambiental es originado por la electricidad consumida. La adición del peróxido de hidrogeno disminuye significativamente el impacto ambiental. [12]

- **Fotocatálisis solar como tratamiento terciario para eliminar contaminantes emergentes de efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales**

En esta investigación se hace un estudio de la eliminación de contaminantes emergentes en la salida de una planta de tratamiento de aguas residuales del este de España, que contiene cantidades de productos farmacéuticos con fotocatalizador.

Se tomaron muestras acuosas que contenían los EP del efluente del tanque de sedimentación secundaria de una planta de tratamiento de aguas residuales. La planta consistió en un tratamiento primario seguido de un reactor biológico aeróbico de lodos activados. Los parámetros principales del efluente estaban entre los rangos: pH: 7.5 conductividad: 2.a – 2.8 mS/cm DOC: 15 – 50 mg DQO: 60 – 120 mg/l.

Como conclusión de este estudio se tiene que la fotocátalisis con TiO_2 se ha demostrado como un tratamiento terciario eficiente. Las concentraciones de los contaminantes se redujeron para alcanzar en la mayoría de los casos valores inferiores a su límite de cuantificación, después de 3h de irradiación. Además, también se observó una desinfección significativa del efluente. [13].

- **Tratamiento combinado de nanofiltración y foto-fenton de agua que contiene micropoluyentes**

El propósito de este estudio fue averiguar si el uso de una combinación de nanofiltración y foto-fenton solar es más eficiente que la foto-fenton sola como tratamiento terciario. Los procesos de fenton, se encuentran probablemente entre los procesos de oxidación avanzada más aplicados al tratamiento de aguas residuales.

Se seleccionaron cinco productos farmacéuticos como modelo para este estudio, carbamazepina, flumequina, ibuprofeno, ofloxacina y sulfametoxazol. Todos ellos eran de grado de alta pureza. Los filtros utilizados fueron filtros de membrana de nylon Millex de 0,2 μm accionados por jeringa. Todos los compuestos se disolvieron en agua natural.

Como conclusión de esta investigación se puede decir que la combinación de nanofiltración y foto-fenton proporciona importantes ventajas operativas. La nanofiltración aumenta el contenido inorgánico del agua. [14].

- **Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería**

En esta investigación se explora la aplicación de tecnologías de oxidación avanzada en las aguas residuales típicas del proceso de refinación de crudo, como tratamiento para la mineralización de compuestos orgánicos con procesos de ozonización. Estas evaluaciones se hacen determinando los cambios de la concentración de los compuestos en función del tiempo, la concentración de los agentes oxidantes, el pH.

Se puso el ozono en contacto con la fase acuosa por medio de un reactor de pulso, el ozono se produjo a partir de un generador, los experimentos para el tratamiento del agua residual se realizaron en dos fases: la primera hasta lograr una degradación del 90% del sustrato, con inyección de ozono. La segunda hasta degradar aproximadamente el 9% del sustrato residual usando oxidación avanzada.

Como conclusión de esta investigación se puede decir que la combinación del tratamiento con ozono con el peróxido de hidrogeno, es un proceso eficiente para la degradación de compuestos orgánicos tóxicos de las aguas residuales. [15]

5. ANTECEDENTES.

En la actualidad se ha intensificado la búsqueda de diferentes diseños de sistemas y de diseños de reactores para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil. También es importante mencionar el estudio del impacto ambiental que estos generan, ya que esto afecta en gran escala al ambiente.

A continuación, se mostrarán algunos estudios de diferentes diseños de sistemas y de diseños de reactores con sus respectivos ACV:

- Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales provenientes de curtiembres con carbón activado modificado con nanopartículas magnetizadas. En esta investigación la metodología que se uso fue primeramente obtener las muestras ubicadas aguas abajo del rio Tunjuelo. Se analizaron para determinar los diferentes parámetros de calidad del agua. Luego se le realizo el respectivo tratamiento a la muestra primeramente eliminando los sólidos sedimentables, se eliminó los contenidos de grasas y aceites y demás tratamientos. Tras hacer esto se determinó la calidad del agua comparando los datos iniciales obtenidos en el laboratorio, para así determinar la viabilidad del reusó de esta en la industria. Luego se realizaron los procedimientos con el carbón activado que en esta investigación es el principal componente. Al final de este procedimiento las nanopartículas se separan por aplicación de campo magnético. Se estudiaron las propiedades magnéticas del material. Y se hicieron las pruebas de tratamiento con carbón activado. Finalmente, con los resultados obtenidos se hizo el diseño conceptual del sistema de tratamiento. (Molina Juan, Angulo Laura 2019).
- Tratamiento de agua residual de la industria textil utilizando nanopartículas magnéticas/biomasa residual como tratamiento terciario. En esta investigación se estudió la posibilidad de utilizar material de desecho orgánico (biomasa residual) con el fin de obtener una mejor calidad de agua alternando técnicas de tratamiento convencionales para ser reutilizadas en otras actividades. (Núñez Sandra, Victoria Tania, 2019)

6. MARCO DE REFERENCIA.

6.1. MARCO TEÓRICO.

6.1.1. AGUA

El agua es un compuesto con características únicas, de gran satisfacción para la vida, el más abundante en la naturaleza y determinante en los procesos físicos, químicos y biológicos que gobiernan el medio natural. [16]

6.1.2. CALIDAD DEL AGUA

capacidad intrínseca que tiene el agua para responder a los usos que se podrían obtener de ella. O desde un punto de vista ambiental, como la define la propuesta de Directiva Marco de las Aguas -a la cual nos referiremos más adelante en su epígrafe específico- como aquellas condiciones que deben darse en el agua para que ésta mantenga un ecosistema equilibrado y para que cumpla unos determinados objetivos de calidad (calidad ecológica). O como el conjunto de características físicas, químicas y microbiológicas que la definen, etc. (Situaci y Existentes [2018]).

Tabla 1. clasificación del nivel de riesgo y acciones según IRCA

Clasificación IRCA (%)	Nivel de Riesgo	IRCA por muestra (notificaciones que adelantará la autoridad sanitaria de manera inmediata)	IRCA mensual (acciones para mejora de la calidad)
80.1 - 100	INVIABLE SANITARIAMENTE	Informar a la persona prestadora, al COVE, Alcalde, Gobernador, SSPD, MPS, INS, MAVDT, Contraloría General y Procuraduría General.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de acuerdo a su competencia de la persona prestadora, alcaldes, gobernadores y entidades del orden nacional.
35.1 - 80	ALTO	Informar a la persona prestadora, COVE, Alcalde, Gobernador y a la SSPD.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de acuerdo a su competencia de la persona prestadora y de los alcaldes y gobernadores respectivos.
14.1 - 35	MEDIO	Informar a la persona prestadora, COVE, Alcalde y Gobernador.	Agua no apta para consumo humano, gestión directa de la persona prestadora.
5.1 - 14	BAJO	Informar a la persona prestadora y al COVE.	Agua no apta para consumo humano, susceptible de mejoramiento.
0 - 5	SIN RIESGO	Continuar el control y la vigilancia.	Agua apta para consumo humano. Continuar la vigilancia.

fuentes: observatoriosaludcauca.gov.co/wp-content/uploads/2018/05/Informe-IRCA-2018.pdf

6.1.3. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

- Temperatura.

La temperatura de un agua se establece por la absorción de radiación en las capas superiores del líquido. Las variaciones de temperatura afectan a la solubilidad de sales y gases en agua y en general a todas sus propiedades, tanto químicas como microbiología. Aunque la temperatura de un agua superficial está ligada a la irradiación recibida, la de las aguas profundas de embalses y lagos de nuestras latitudes experimentan una secuencia cíclica caracterizada por dos períodos: (a) uno de "mezcla térmica" con temperatura similar en profundidad, y (b) otro de "estratificación térmica" con aguas más cálidas en superficie y más frías en el fondo e imposibilidad de mezcla vertical de capas de agua. Estos períodos rigen las características fisicoquímicas de la masa de agua en cada caso (ver figura). La temperatura de las aguas subterráneas depende del terreno, naturaleza de las rocas, profundidad de la surgencia y fenómenos magmáticos que puedan existir. (Mar [2017])

- Conductividad eléctrica.

Se define la conductividad eléctrica como la capacidad de que una sustancia pueda conducir la corriente eléctrica, y por tanto, es lo contrario de la resistencia eléctrica. Es una variable que depende de la cantidad de sales disueltas en un líquido. La unidad de medición utilizada comúnmente es el siemens/cm (S/cm), microsiemens/cm ($\mu\text{S/cm}$), o milisiemens/cm (mS/cm).

En soluciones acuosas el valor de la conductividad es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos. Por lo tanto, cuanto mayor sea dicha concentración mayor será la conductividad, como puede observarse en los valores apuntados a continuación: Agua pura: $0,055 \mu\text{S/cm}$. Agua destilada: $0,5 \mu\text{S/cm}$. Agua de montaña: $1,0 \mu\text{S/cm}$. Agua de uso doméstico: $500\text{-}800 \mu\text{S/cm}$. Agua de mar: $50.000\text{-}60.000 \mu\text{S/cm}$. [19].

Tabla 2 Conductividad del agua

Tabla de conductividad del Agua	
Agua ultra pura	$0,055 \mu\text{S/cm}$
Agua destilada	$0,5 \mu\text{S/cm}$
Agua de montaña	$1,0 \mu\text{S/cm}$
Agua doméstica	$500 \text{ a } 800 \mu\text{S/cm}$
Max. Para agua potable	1055 mS/cm
Agua de mar	56 mS/cm
Agua salobre	100 mS/cm

- Dureza.

La dureza del agua corresponde a la suma de calcio y magnesio, a los que se añaden los iones hierro, aluminio, manganeso, etc. Su medida se expresa habitualmente en °F (grados franceses) °dH (grados alemanes) o ppm de carbonato cálcico (CaCO₃). Las equivalencias entre estas unidades son las siguientes:

$$1 \text{ °F} = 10 \text{ ppm de CaCO}_3$$

$$1 \text{ °dH} = 1,78 \text{ °F}$$

$$1 \text{ °dH} = 17,8 \text{ ppm de CaCO}_3$$

Los carbonatos, sulfatos y cloruros provienen de la acción del agua sobre las rocas. Los bicarbonatos proceden de la acción combinada del agua y del bicarbonato que ésta lleva disuelto. Los carbonatos son muy poco solubles en agua, por lo que en presencia de anhídrido carbónico se irán descomponiendo y formarán bicarbonatos de gran solubilidad. Entonces el agua podrá seguir disolviendo rocas que tengan contenido en carbonatos y los pasará a bicarbonatos en disolución. Las sales como los carbonatos, que tienen la constante de solubilidad muy baja, son las que producen las incrustaciones. Otras sales como el cloruro cálcico, no son muy incrustantes (la constante de solubilidad es más alta), pero sí muy corrosivas, sobre todo en aguas calientes y calderas. El sulfato magnésico se comporta de igual forma. El cloruro magnésico es muy incrustante a altas presiones y se descompone en hidróxido de magnesio (insoluble y produce muchas incrustaciones) y ácido clorhídrico (muy corrosivo, produce corrosiones en los metales).

La dureza del agua está formada por las sales de calcio y de magnesio. La dureza procedente de las sales de calcio se llama dureza cálcica y la dureza procedente de las sales de magnesio se llama dureza magnésica. [19]

Tabla 3 Índices del dureza del agua

Denominación	Ppm de CaCO ₃
Muy suaves	0-15
Suaves	16-75
Medias	75-150
Duras	150-300
Muy duras	Mayor a 300

Fuente: Autora

- Sólidos.

El agua puede contener tanto partículas en suspensión como compuestos solubilizados, definiéndose la suma de ambos como Sólidos Totales (ST). La determinación de ST se realiza, conforme a la norma UNE 77030:1982, evaporando un volumen conocido de muestra y secando el residuo en estufa a 105 °C, hasta pesada constante, indicándose el resultado en mg/L. Esta medida nos permite conocer el contenido total de sustancias no volátiles presentes en el agua. [20]

Además del contenido en sólidos totales, conviene conocer que parte de estos sólidos se encuentra disuelta (SD) y que otra es sedimentable (Ss). Los Ss se determinan por decantación (UNE 77032:1982) a partir de un volumen de muestra de un litro dejado en reposo en un recipiente cónico (cono Imhoff) durante una hora, expresándose el volumen sedimentado en el fondo del cono en ml/L. Los Ss nos dan una idea de la cantidad de lodos que se producirán en la decantación primaria. Los sólidos disueltos se determinan gravimétricamente mediante filtración, a vacío o presión, con filtros de fibra de vidrio de borosilicato de diámetro de poro de 0,45 µm, de un volumen conocido de agua bruta, denominándose Sólidos en Suspensión (SS) el residuo seco retenido en los mismos (UNE-EN 872:1996) expresado como mg/L. Al residuo del filtrado secado a 105 °C se le denomina Sólidos disueltos (SD), y se expresa también en mg/L (UNE 77031:1982). [20].

- Color, olor y sabor.

Son lo que se denomina propiedades organolépticas o determinables por los sentidos. No suelen ser una medida precisa del nivel de contaminación, aunque su presencia es un indicio de que la depuración de un efluente no está siendo correcta. Tiene gran importancia en aguas potabilizables, por el rechazo que puede darse en el consumidor al detectar colores, olores o sabores que no asocie con “agua pura”.

- Color (UNE-EN ISO 7887:1995): No existe una relación directa entre color y grado de contaminación, pues al tratarse de un parámetro fuertemente influido por interferencias con otras sustancias coloreadas, es difícil su evaluación absoluta. Dado que muchas de las sustancias coloreadas se degradan con el tiempo, la determinación del color se debe realizar en las veinticuatro horas posteriores a la toma de muestra, conservándose las mismas refrigeradas (2-5 °C) y en la oscuridad. La determinación del color se efectúa visualmente empleando luz diurna difusa sobre fondo blanco, o mediante el uso de un espectrofotómetro visible. El color que presenta el agua puede ser aparente (agua bruta) o verdadero (agua sin sólidos en suspensión). [20]

- Olor: Generalmente los olores son producidos por sustancias volátiles (COV's) o gaseosas (H₂S, NH₃, etc.), y suelen ser debidos a materia orgánica en descomposición o productos químicos producidos o empleados en la industria y tratamiento de aguas residuales. El olor se determina por sucesivas diluciones de la muestra original con agua inodora (T^a≈ 40 °C) hasta que es indetectable (umbral de percepción), siendo un ensayo muy subjetivo y de escasa reproducibilidad. Las muestras deben conservarse en vidrio un máximo de 6 h a 2-5 °C. [20]

- Sabor: Suele estar íntimamente asociado al olor (respuesta fisiológica parecida). Algunas sustancias, como es el caso de sales de cobre, zinc o hierro, pueden modificar el sabor, sin alterar el color del efluente. Su determinación se efectúa, al igual que el olor, por dilución hasta determinar el umbral de percepción y sólo se realizará con muestras que sean sanitariamente aptas para consumo humano. [20].

- Oxígeno Disuelto.

es necesario para la respiración de los microorganismos aerobios, así como para otras formas de vida aerobia. No obstante, el oxígeno es ligeramente soluble en el agua; la cantidad real de oxígeno que puede estar presente en la solución está determinada por a) la solubilidad del gas, b) la presión parcial del gas en la atmósfera, c) la temperatura, y d) la pureza del agua (salinidad, sólidos suspendidos). La interrelación de estas variables debe ser consultada en textos apropiados (ver bibliografía) para conocer los efectos de la temperatura y la salinidad sobre la concentración de OD. [21].

- DBO.

es una medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable, en condiciones aeróbicas, en un periodo de cinco días a 20 °C. En aguas residuales domésticas, el valor de la DBO a cinco días representa en promedio un 65 a 70% del total de la materia orgánica oxidable. La DBO, como todo ensayo biológico, requiere cuidado especial en su realización, así como conocimiento de las características esenciales que deben cumplirse, con el fin de obtener valores representativos confiables. El ensayo supone la medida de la cantidad de oxígeno consumido por organismos vivos en la utilización de la materia orgánica presente en un residuo; por tanto, es necesario garantizar que durante todo el periodo de ensayo exista suficiente oxígeno disuelto para ser utilizado por los organismos. [22].

- DQO.

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo. Las sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables presentes en la muestra, se oxidan mediante reflujado cerrado en solución fuertemente ácida (H_2SO_4) con un exceso de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en presencia de sulfato de plata (Ag_2SO_4) que actúa como agente catalizador, y de sulfato mercurico ($HgSO_4$) adicionado para eliminar la interferencia de los cloruros. [23].

6.1.4. INDUSTRIA TEXTIL

El término industria textil (del latín *texere*, tejer) se refería en un principio al tejido de telas a partir de fibras, pero en la actualidad abarca una amplia gama de procesos, como el punto, el tufting o anudado de alfombras, el enfieltado, etc. Incluye también el hilado a partir de fibras sintéticas o naturales y el acabado y la tinción de tejidos. [24].

El término industria textil (del latín *texere*, tejer) se refería en un principio al tejido de telas a partir de fibras, pero en la actualidad abarca una amplia gama de procesos, como el punto, el tufting o anudado de alfombras, el enfieltado, etc. Incluye también el hilado a partir de fibras sintéticas o naturales y el acabado y la tinción de tejidos. El término industria textil (del latín *texere*, tejer) se refería en un principio al tejido de telas a partir de fibras, pero en la actualidad abarca una amplia gama de procesos, como el punto, el tufting o anudado de alfombras, el enfieltado, etc. Incluye también el hilado a partir de fibras sintéticas o naturales y el acabado y la tinción de tejidos. [25].

6.1.5. CONTAMINACIÓN A LAS AGUAS POR LA INDUSTRIA TEXTIL

La industria textil es una de las industrias con mayor consumo de agua y las aguas residuales que se generan contienen un gran número de contaminantes de diferente naturaleza. Entre los contaminantes se destacan los colorantes. Estos compuestos se diseñan para ser altamente resistentes, incluso a la degradación microbiana, por lo que son difíciles de eliminar en las plantas de tratamiento convencionales. En este trabajo se da una breve descripción de la industria textil y de los contaminantes

que se generan en los diferentes procesos, haciendo énfasis en los colorantes. (Autonoma [2016]).

6.1.6. AGUAS RESIDUALES

Las características de las aguas residuales generadas en una planta textil dependerán de las operaciones específicas que se realicen, principalmente, del tipo de fibra tratada y de la maquinaria utilizada. Las aguas residuales que se producen en la industria de fibras naturales, a excepción de las procedentes del lavado de lana, se caracterizan por una gran variabilidad de caudal y carga contaminante, así como un bajo contenido en materias coloidales y en suspensión. Comúnmente, son coloreadas, y su carga orgánica media es aproximadamente el doble que la de un agua residual urbana y no suelen ser tóxicas. [27].

Los efluentes de fibras naturales se caracterizan por una gran variabilidad de caudal y de carga contaminante, así como un bajo contenido de materias en suspensión y coloidales. Generalmente son coloreadas, y su carga orgánica media es aproximadamente el doble que el de un agua residual urbana y no acostumbra a contener productos tóxicos ni microorganismos patógenos. Además, acostumbran a ser deficientes en nutrientes, principalmente en nitrógeno. Dentro del sector textil, se encuentran dos grupos bien diferenciados de empresas según el curso receptor de sus vertidos: empresas que vierten sus aguas residuales a una red cloacal y empresas que las vierten a un curso de agua. Este segundo grupo de empresas que vierte directamente a un curso de agua debe cumplir con unos límites de vertido que de manera genérica acostumbran a ser más restrictivos que los límites de vertido a red cloacal. [27].

El amplio uso que tienen los auxiliares en la industria textil ha hecho que se prestara atención a sus consecuencias ambientales desde hace mucho tiempo, especialmente, a la tendencia que tienen a la formación de espumas, al aumento de la carga biodegradable y a la contaminación con productos tóxicos observados en la descarga de los efluentes que los contienen. Por estas razones, han ido surgiendo en diferentes comunidades restricciones a su uso y reglamentaciones que condicionan su vertido. En base a ello, la Subcomisión de Auxiliares Textiles decidió reunir los principales criterios involucrados en el uso de estos productos y su relación con el ambiente. Muchos países han promulgado regulaciones que obligaron a las industrias a prestar atención al tema de contaminación ambiental.

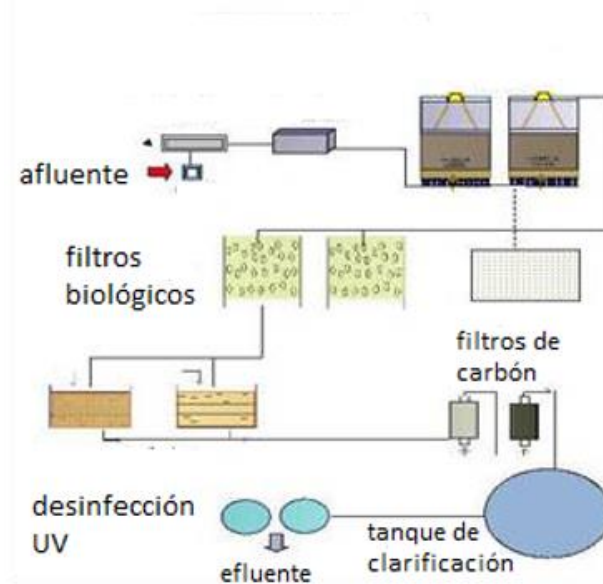
Sin embargo, las industrias no deben considerar el control de la contaminación como un sobre costo sin retorno. De acuerdo a la definición de Boyston “la contaminación es un signo de ineficiencia en la producción industrial”. Considera que la contaminación es dinero que se va por la chimenea, con los efluentes y en forma de residuos. La contaminación es, sobre todo, una descarga de materiales y energía en el ambiente. [27].

En la evaluación ecológica de los productos para el acabado textil, incluyendo sus sustancias acompañantes (p.ej. formaldehído, monómeros, disolventes) se deben considerar los factores siguientes: - La toxicidad durante la aplicación del producto, en el ambiente de trabajo. - La contaminación de las aguas residuales - Las emisiones atmosféricas durante el secado y la condensación. - La influencia que pueda ejercer la prenda terminada en la salud del usuario. [27].

6.1.7. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua efluente del uso humano. El objetivo del tratamiento es producir agua limpia (o efluente tratado) o reutilizable en el ambiente y un residuo sólido o fango (también llamado biosólido o lodo) convenientes para la disposición o reúso. Es muy común llamarlo depuración de aguas residuales para distinguirlo del tratamiento de aguas potables. («Las aguas residuales y sus efectos contaminantes | iAgua» [2010]).

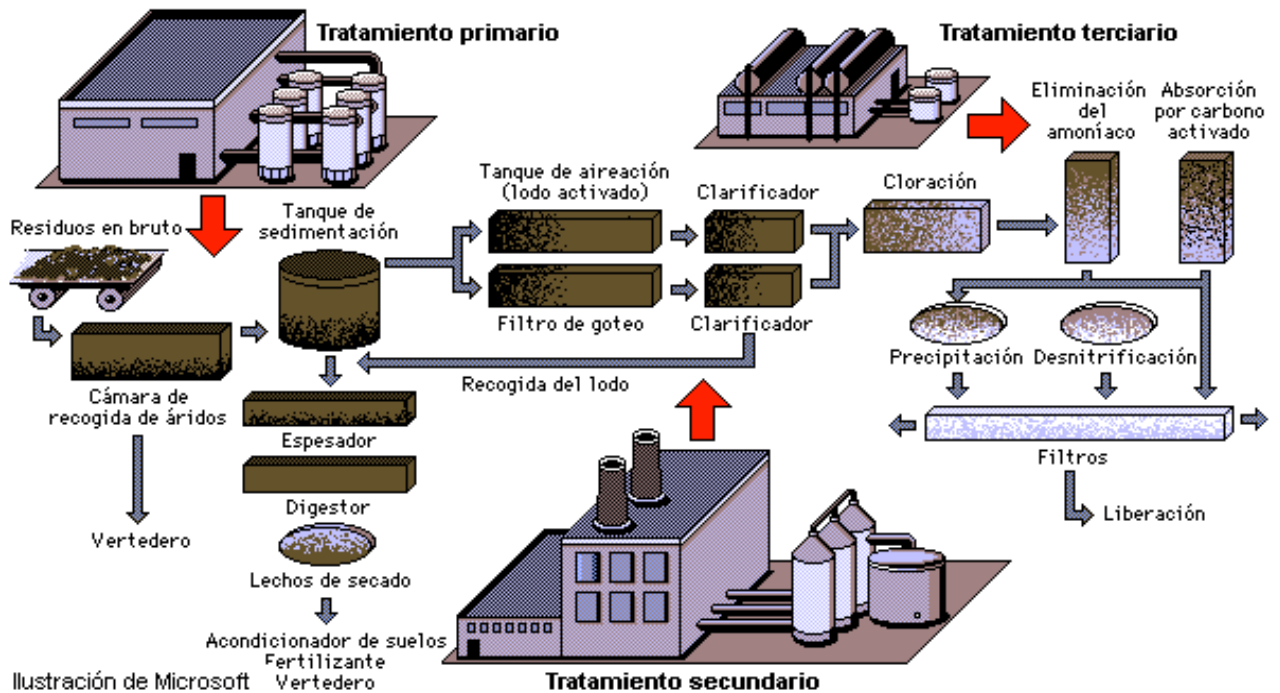
Figura 1 Tratamiento de aguas residuales



- **Pretratamientos:**
Los pretratamientos de aguas residuales implican la reducción de sólidos en suspensión o el acondicionamiento de las aguas residuales para su descarga bien en los receptores o para pasar a un tratamiento secundario a través de una neutralización u homogeneización. [29].
- **Tratamiento primario:** Involucra la evacuación de tanta materia sólida remanente como sea posible. El drenaje fluye hacia grandes tanques llamados Tanques de Sedimentación Primaria donde las partículas más pequeñas se asientan en el fondo. Un Lodo Primario o Lodo Crudo es barrido por restregadores eléctricos hacia una tolva y luego es bombeado a la planta de asimilación de lodos. El líquido restante llamado Efluente Primario pasa a un tratamiento secundario o proceso de sedimentación secundaria. [30].
- **Tratamiento secundario:**
El propósito del Tratamiento Secundario es completar el proceso de tal modo que se evacúe el 90% de los contaminantes. El equipo usado es un Tanque de Aireación que proporciona enormes cantidades de aire a una mezcla de aguas residuales, bacterias y otros micro-organismos. El oxígeno en el aire acelera el crecimiento de micro-organismos útiles que consumen la materia orgánica dañina en el agua residual. [30].
- **Tratamiento terciario:**
Consisten en procesos físicos y químicos especiales con los que se consigue limpiar las aguas de contaminantes concretos: fósforo, nitrógeno, minerales,

metales pesados, virus, compuestos orgánicos, etc. Es un tipo de tratamiento más caro que los anteriores y se usa en casos más especiales como por ejemplo para purificar desechos de algunas industrias. Una mejor posibilidad para el tratamiento terciario consiste en agregar uno o más estanques en serie a una planta de tratamiento convencional. El agregar esos estanques de “depuración” es una forma apropiada de mejorar una planta establecida de tratamiento de aguas residuales, de modo que se puedan emplear los efluentes para el riego de cultivos o zonas verdes y en acuicultura. [30].

Figura 2 Proceso tratamiento de agua



6.1.8. OXIDACIÓN AVANZADA

Los POA se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes, que involucran la generación y uso de especies poderosas transitorias, principalmente el radical hidroxilo ($\text{OH}\cdot$). Además, la generación de radicales se realiza a partir de oxígeno, agua oxigenada y catalizadores soportados, por lo que los subproductos de reacción son únicamente agua y dióxido de carbono.

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. [9].

Este radical posee alta efectividad para la oxidación de materia orgánica en condiciones suaves de presión y temperatura, hasta la mineralización completa de estos contaminantes. Debido a la altísima reactividad de estas especies es posible eliminar tanto compuestos orgánicos como inorgánicos logrando así una reducción de DQO, COT y toxicidad en las aguas residuales tratadas. Así, la generación de radicales hidroxilos se puede acelerar por la combinación de algunos agentes oxidantes como ozono, peróxido de hidrogeno, radiación UV, sales de hierro [Fe (II) y Fe (III)] y catalizadores como dióxido de titanio. Los POA se pueden clasificar de diversas formas, entre ellas como procesos no fotoquímicos y procesos fotoquímicos en función de la participación de la luz en el proceso..[9].

6.1.8.1. Procesos utilizados.

Los POA emplean reactivos caros, como el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) o el ozono (O_3), o consumen grandes cantidades de energía (UV, entre otras). Se ha demostrado que cuando se combinan con otros procesos, tales como adsorción o procesos biológicos alcanzan, su potencial en cuanto a eficiencia económica por el ahorro en productos químicos y/o energía. Estos procesos se pueden clasificar de diversas formas, incluyendo fotoquímicos y no fotoquímicos, como se muestra en la Figura 1. En el primer caso se necesita una radiación (ex. UV o UV-vis), mientras que los segundos requieren el uso de compuestos químicos (O_3 , H_2O_2 , Fe^{2+}) o

procesos eléctricos (electroquímicos, en este caso). En la Tabla 1 se muestran los procesos no fotoquímicos y fotoquímicos desarrollados. [9].

Tabla 4 POA

Procesos no fotoquímicos	Procesos fotoquímicos
Ozonización	Ultravioleta de vacío
Ozonización con O ₃ / H ₂ O ₂	UV/ H ₂ O ₂
Procesos fenton	UV / O ₃ / H ₂ O ₂
Oxidación electroquímica	Fotocatálisis solar Homogénea: foto-fenton Heterogénea: fotocatalisis con TiO ₂
Radiolisis y tratamiento con heces de electrones	
Plasma no térmico	
Oxidación en agua suscritica y supercrítica	
Irradiaciones gamma	
Aceleradores de electrones	

Fuente: Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales/ Monge, Sarai /Torres, André / Silva, Adrián / 2018

6.1.9. REACTORES DE OXIDACIÓN AVANZADA

Un reactor químico es una unidad de proceso diseñada para llevar a cabo una o varias reacciones químicas. Esta definición generalmente implica un sistema bien delimitado, casi siempre un recipiente cerrado, con líneas de entrada y salida claramente especificadas y un estricto algoritmo de control. La importancia del reactor viene dada porque condiciona en gran medida el éxito de una planta química. Esto es así porque, aunque el coste del reactor en sí mismo, incluyendo su equipo auxiliar, a menudo constituye sólo una pequeña parte del coste total en la planta, los procesos de separación de productos y tratamiento de efluentes, una fracción muy significativa no sólo del inmovilizado en la planta sino sobre todo de sus costes de operación, dependen fuertemente de la composición obtenida a la salida del reactor. [10].

En los reactores, además, donde suele encontrarse la mayor complejidad del proceso, las condiciones más severas de presión y temperatura y las mejores

oportunidades para el desarrollo del proceso, junto con las probabilidades más altas para un accidente grave en la operación de la planta. El diseño del reactor debe asegurar que éste cumpla con su objetivo: proporcionar un producto dado a partir de reactantes conocidos, con una velocidad y selectividad determinadas, mediante un proceso seguro y respetuoso con el medio ambiente. [10].

En el diseño del reactor es necesario:

- ✓ Seleccionar el tipo
- ✓ Dimensionar
- ✓ Realizar el diseño o ingeniería de detalle

6.1.9.1. Clasificación de los reactores.

Los reactores pueden clasificarse según los siguientes criterios:

- Tipo de modelo de flujo: ideal al que tiende (mezcla perfecta, flujo en pistón) o real.
- Número de fases en contacto: homogénea (1 fase), heterogénea (2 fases = bifásica, 3 fases = trifásica, o multifásica).
- Modo de operación: continuo, semicontinuo, discontinuo.
- Evolución en el tiempo: régimen estacionario y régimen no estacionario.
- Tipo de reacción química: catalítica, bioquímica, esterificación. [31].

Los reactores químicos tienen como funciones principales: Asegurar el tipo de contacto o modo de fluir de los reactantes en el interior del tanque, para conseguir una mezcla deseada con los materiales reactantes. Proporcionar el tiempo suficiente de contacto entre las sustancias y con el catalizador, para conseguir la extensión deseada de la reacción. Permitir condiciones de presión, temperatura y composición de modo que la reacción tenga lugar en el grado y velocidad deseada, atendiendo a los aspectos termodinámico y cinético de la reacción. [10].

6.1.10. BALANCE DE MASA Y ENERGÍA

6.1.10.1. Balance de masa

El balance de masa, puede definirse como una contabilidad de entradas y salidas de masa en un proceso o de una parte de éste. No es más que la aplicación de la ley de conservación de la masa que expresa “La masa no se crea ni se destruye”. La realización del balance es importante para el cálculo del tamaño de los equipos de un proceso que se emplean y por ende para evaluar sus costos. Los cálculos de balance de masa son casi siempre un requisito previo para todos los demás cálculos, además, las habilidades que se adquieren al realizar los balances de masa se pueden transferir con facilidad a otros tipos de balances. [32]

Es una secuencia de cálculos que permite llevar la cuenta de todas las sustancias que intervienen en un proceso de transformación, satisfaciendo la ley de la conservación de la masa, la cual establece que la materia se transforma, pero no se crea ni se destruye. Un balance de materia es, pues, una contabilidad de los materiales que toman parte del proceso. Las sustancias pueden entrar, salir, producirse, acumularse o consumirse durante el proceso. Se entiende por proceso cualquier conjunto de operaciones que produce una transformación física o química en una sustancia o en un grupo de sustancias.[32]

Al hacer el conteo del material que participa en un proceso deben considerarse las entradas y las salidas que atraviesan las fronteras del sistema, las reacciones químicas que suceden pues en ellas se presenta consumo y producción de material y la cantidad de éste que se acumula. Por ello, el balance de materiales responde a esta ecuación: $\text{Material que entra al sistema} + \text{material producido dentro del sistema} - \text{material que sale del sistema} - \text{material consumido dentro del sistema} = \text{Material acumulado dentro del sistema}$. Si al aplicar esta ecuación se tienen en cuenta todos los componentes de las corrientes del proceso, se realiza un balance total de masa, y si se aplica solamente a alguna sustancia o a algún elemento químico se efectúa un balance parcial de masa. La ecuación anterior, llamada ecuación general de balance de masa, puede ser empleada con unidades correspondientes a velocidades de flujo o a cantidades. En el primer caso el balance de masa corresponde a una unidad de tiempo determinado (una hora, un día, etc) y se aplica a procesos continuos y recibe el nombre de balance diferencial. En el segundo caso el balance corresponde a una determinada cantidad de material

procesado o producido, aplicándose, por lo general, a procesos intermitentes y denominándose balance integral. [32].

6.1.11. CICLO DE VIDA

“el Análisis de Ciclo de Vida es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto: compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio” [33].

El ciclo de vida de un producto considera toda la historia del producto, desde su origen como materia prima hasta su final como residuo. Se tienen en cuenta todas las fases intermedias como transporte y preparación de materias primas, manufactura, transporte y preparación de materias primas, manufactura, transporte a mercados, distribución, uso, etc. («Capítulo 3 metodología del análisis del ciclo de vida» [2016]).

6.1.11.1. Origen del ciclo de vida (ACV)

El desarrollo del ACV se originó casi simultáneamente en Estados Unidos y Europa.

Entre 1970 y 1974, la Environmental Protection Agency (EPA) realizó nueve estudios de envases para bebidas. Los resultados sugirieron no utilizar el ACV en cualquier estudio, especialmente en empresas pequeñas ya que esto implica grandes costos y consume mucho tiempo.

La Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) es la principal organización que ha desarrollado y liderado las discusiones científicas acerca del ACV.

6.1.11.2. Unidad Funcional del ACV

La unidad funcional es el elemento clave del ACV y ha de ser definido claramente. Es la medida de la función del sistema estudiado y da una referencia de cuáles son las entradas y salidas relacionadas. Esto permite la comparación de dos sistemas diferentes. La definición de la unidad funcional puede ser difícil. Ha de ser precisa y suficientemente comparable para ser utilizada como referencia. [35].

6.1.11.3. Metodología del ACV

La norma ISO 14040:1997 establece que “el ACV es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados con un producto, lo cual se efectúa recopilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio”. («Capítulo 3 metodología del análisis del ciclo de vida» [2015]).

El ACV tiene cuatro fases:

- ✓ Definición de los objetivos y el alcance: En los objetivos se exponen los motivos por los que se desarrolla el estudio, la aplicación prevista y a quién va dirigido. El alcance consiste en la definición de la amplitud, profundidad y detalle del estudio.
- ✓ Análisis del inventario: Esta fase incluye la identificación y cuantificación de las entradas (consumo de recursos) y salidas (emisiones al aire, suelo y aguas y generación de residuos) del sistema del producto. Por sistema del producto se entiende el conjunto de procesos unitarios conectados material y energéticamente que realizan una o más funciones idénticas.
- ✓ Evaluación del impacto: Durante esta etapa, utilizando los resultados del análisis de inventario, se evalúa la importancia de los potenciales impactos ambientales generados por las entradas y salidas del sistema del producto.
- ✓ Interpretación de resultados: la cual incluye la combinación de los resultados de las dos etapas anteriores, con la finalidad de extraer, de acuerdo a los

objetivos y alcance del estudio, conclusiones y recomendaciones que permitan la toma de decisiones.

La segunda y tercera fase se denominan fases activas o dinámicas y en ellas se recopilan y se evalúan los datos. La primera y cuarta fase son las fases estáticas.

El ACV es un proceso que se retroalimenta a medida que se va realizando, a partir de los resultados de una fase pueden reconsiderarse las hipótesis de la fase anterior.

6.1.11.4. Estructura del ACV

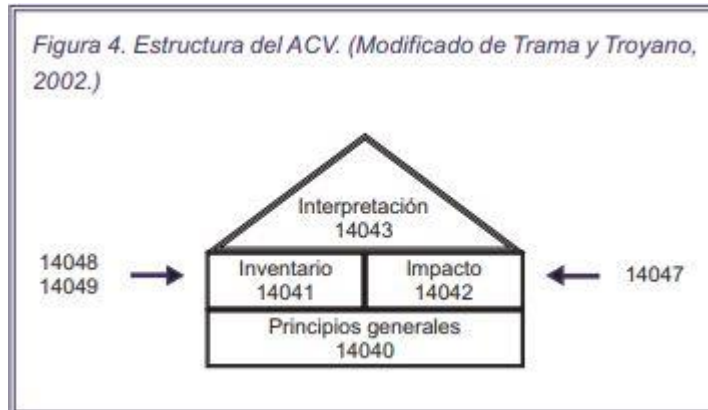
Norma ISO14040 → Establecen los fundamentos de la evaluación del ciclo de vida.

Norma ISO/TR14047 → Ejemplos ilustrativos de cómo aplicar la norma ISO14042.

Norma ISO14048 → Formato para la documentación de datos para el ACV.

Reporte técnico ISO/TR14049 → Ejemplos ilustrativos de cómo aplicar la norma ISO14041.

Figura 3 Estructura del ACV



Fuente: el análisis de ciclo de vida y la gestión ambiental /Blanca Iris Romero / disponible en <https://www.ineel.mx/boletin032003/tend.pdf>

En la figura se puede ver de una manera más detallada y concreta la estructura del Análisis del ciclo de vida.

En conclusión, el ACV puede contribuir en la toma de decisiones ambientales en las industrias, oportunidades de mejora en los aspectos ambientales en las distintas etapas ambientales del ciclo de vida.

6.1.12. CATEGORÍAS DE IMPACTO AMBIENTAL EN LOS PROCESOS

1. Potencial de agotamiento de los recursos abióticos (ADP)

Se define como la disminución de la disponibilidad de los recursos naturales. En un Análisis de Ciclo de Vida se puede medir el efecto relativo del consumo de los recursos sobre el agotamiento de estos recursos teniendo en cuenta su escasez relativa y el horizonte temporal en el cual se cree que se agotarán. Se pueden incluir acá los recursos abióticos y la energía usada en los procesos. [12].

2. Potencial de calentamiento global

El efecto invernadero es un fenómeno que se da por que la energía que es redistribuida por la atmosfera y los océanos a la tierra en forma de radiación de infrarrojo térmico, una parte de esta es absorbida por los gases que están en la atmosfera provocando el calentamiento del planeta. Estos gases los podemos ver

en los procesos de oxidación avanzada en gran cantidad (vapor de agua, CO₂, CH₄, N₂O y CFCs).

Este calentamiento global afecta en el ámbito de la salud humana, en el ambiente natural.

3. Potencial de agotamiento del Ozono estratosférico

La capa de ozono que está presente en la estratosfera y actúa como filtro absorbiendo la radiación ultravioleta. La disminución de la capa de ozono provoca un incremento de la cantidad de radiación UV-B que llega a la superficie de la tierra. Dichas radiaciones son causa de un aumento de algunas enfermedades en humanos, afectan a la producción agrícola, degradación de materiales plásticos e interfieren en los ecosistemas.

4. Potencial de Acidificación

Consiste en la deposición de los ácidos resultantes de la liberación de óxidos de nitrógeno y sulfuro en la atmósfera, en el suelo y en el agua, donde puede variar la acidez del medio, esto afecta la flora y la fauna, produce deforestación.

6.1.13. SOFTWARE GABI

El software GaBi es una herramienta para realizar estudios de Análisis del ciclo de vida (ACV) además sirve también para realizar estudios de huella de carbono; análisis del ciclo de costes (ACC) estudios sobre aspectos sociales; estudios de ecodiseño entre otros. Contiene todos los elementos necesarios para modelar productos y sistemas desde una perspectiva de ciclo de vida.

Los usuarios pueden construir modelos para cualquier producto, hacer balances de entradas y salidas de emisiones, materiales y energía, y crear informes interactivos. GaBi incorpora acceso a bases de datos ambientales sobre la fabricación de materiales, producción y uso de combustibles y electricidad, transporte de mercancías, tratamiento de residuos, que cubren una amplia gama de necesidad de los usuarios.

GaBi aporta flexibilidad y versatilidad, siendo aplicable en todo tipo de procesos y productos. Una amplia y rigurosa base de datos ambientales a nivel mundial.

Facilidad en la interpretación de resultados. Se obtienen los resultados de manera rápida.

GaBi fue creada por Thinkstep y es hoy la mayor base de datos de Análisis del ciclo de vida en el mercado y contiene más de 7000 perfiles de inventario listos para el uso de ciclo de vida. GaBi permite utilizar las metodologías de evaluación de impacto más importantes y actualizadas: ILCD 2011 Midpoint, CML 2013, ReCiPe 1.08, IPCC y Traci 2.1.

Con esta herramienta se facilita el análisis y la representación gráfica de ciclos de vida complejos, de un modo sistemático y transparente.

6.2. MARCO LEGAL

Tabla 5 Marco legal

TIPO	ENTIDAD	AÑO	DESCRIPCIÓN
Resolución 0631	Ministerio de ambiente	2015	Se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.
Decreto 1076	Ministerio de ambiente	2015	Protección y aprovechamiento de los cuerpos de agua, y el buen aprovechamiento de los flujos naturales de agua.
Resolución 64 - 292	Asamblea general de las naciones unidas	2010	Acceso seguro al agua potable y al saneamiento como un derecho humano fundamental.
Resolución 1207	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible	2014	Establece las disposiciones relacionadas con el uso del agua residual tratada
Resolución 0883	Ministerio de ambiente	2018	Valores límites máximos permitidos en los vertimientos

<i>Continuación de la tabla 5</i>			
Decreto 3930	Ministerio de ambiente	2019	Valores de cómo obtener índices de calidad de los recursos hídricos, norma de vertimientos y permisos de vertimientos.
Ley 373	Congreso de Colombia	1997	Reusó obligatorio de las aguas de origen superficial, subterráneo o lluvias.
Norma ISO 14040	La International Standarization Ortanization (ISO)		Regula la metodología de evaluación ambiental de análisis de ciclo de vida de un producto. trata de una metodología de evaluación ambiental que permite analizar y cuantificar los aspectos ambientales e impactos potenciales de un producto o servicio a lo largo de su ciclo de vida, es decir, de todas las etapas de su existencia.

Fuente: autora

7. OBJETIVOS

7.1. OBJETIVO GENERAL.

- Estudiar el impacto ambiental de la implementación de reactores de oxidación avanzada para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil.

7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Definir los tipos de reactores y las configuraciones de oxidación avanzada más adecuados para tratar agua residual de la industria textil.
- Realizar los balances de masa y energía de las configuraciones de reactores seleccionados.
- Llevar a cabo un análisis de ciclo de vida de los reactores de oxidación avanzada para el tratamiento de agua residual textil.

8. ALCANCE Y LIMITACIONES.

8.1. ALCANCE.

Esta investigación tiene como finalidad estudiar el impacto ambiental que se tiene en la implementación de los reactores como procesos de oxidación avanzada para el tratamiento de agua residual textil en tres diferentes tipos, teniendo así un comparativo entre los tres métodos y poder ver de una forma más clara cuál de los tres procesos genera más impacto ambiental por medio de los análisis de ciclo de vida hechos por el software GaBi.

8.2. LIMITACIONES.

- Demoras en la licencia del software GaBi.
- Poca información de los procesos para generar los balances de masa.
- Entendimiento de cómo manejar el software.

Para las limitaciones se debe contar con segundos planes para llevar a cabo:

- Tener un segundo software, en caso de no obtener la licencia de GaBi.
- Tener acceso a diferentes bases de datos para tener más información de los procesos.

9. METODOLOGÍA

En la metodología utilizada en este trabajo de investigación, se buscó la información de los tres documentos con los tres diferentes tipos de reactores, luego se estudió cada uno de los documentos seleccionados para así saber qué información estaba incompleta y buscarla en diferentes bases de datos con tesis similares y tener la información completa.

Se hicieron los respectivos balances de masa y energía de cada uno de los tipos de reactores, para tener la información completa e ingresar los valores al software GaBi. Luego se hizo un estudio de las diferentes categorías de impacto, para así saber en qué categorías se iban a hacer las diferentes comparaciones entre los tres tipos de reactores con las gráficas que arrojó el software GaBi.

Al tener las diferentes gráficas, se procedió a clasificar la información por cada categoría de impacto, y así realizar una gráfica general de cada categoría donde se puso la información arrojada del software de cada uno de los tres tipos de reactores y poder hacer un análisis más detallado de cada una de las categorías.

Por último, se hizo una sola grafica de todas las categorías de impacto con cada uno de los tres tipos de reactores para poder hacer la comparación en general y poder determinar cuál es el tipo de reactor que más genera impacto ambiental con las categorías seleccionadas en este trabajo.

9.1. BUSQUEDA DE INFORMACIÓN

Se revisó las diversas literaturas de las diferentes configuraciones de reactores de oxidación avanzada. Esto mediante la revisión en bases de datos (Science Direct, Springerlink, Wiley, ACS Journals, etc.), repositorios de tesis de pregrado y postgrado asociados a diseño de reactores de oxidación avanzada, tanto para procesos de catálisis homogéneas (Fenton, Ozono y peróxido de hidrogeno) como para procesos de catálisis heterogénea (Dióxido de titanio y Óxido de Zinc) y procesos combinados. También el impacto ambiental que estos procesos generan en su implementación.

Para encontrar la información necesaria se buscó en diferentes bases de datos para así encontrar los tres tipos de reactores más adecuados. Se encontraron diferentes tesis y documentos cada uno con sus respectivos diseños de reactores. Es importante saber que en este estudio solo se abarcó la parte del reactor en específico, no de todo el proceso de una planta de tratamiento.

Como primera medida para escoger los tres documentos se miró que cada uno fuera un tipo de reactor diferente para poder comparar los resultados obtenidos en los Análisis de ciclo de vida.

Como segunda medida para escoger los documentos fue que cada uno contara con suficiente información de los parámetros físico-químicos de las muestras que usaron en el estudio, así mismo que diera información del caudal, información de cada tipo del reactor, materiales, información de los datos de entrada y de salida del reactor, también de los insumos que se usaron en cada uno y de la energía que cada uno requiere, ya que todos estos datos son fundamentales para el estudio.

Se decidió escoger tres documentos, el primero fue un artículo científico “tratamiento de aguas residuales textiles mediante un biorreactor de membrana” el segundo es una tesis “evaluación del proceso de ozono – fenton para el tratamiento de aguas residuales de una industria textil” y la tercera una tesis de maestría “degradación de un efluente textil real mediante procesos fenton y foto – fenton. Cada uno de estos son procesos diferentes para el tratamiento de aguas residuales en la industria textil.

En el caso de que faltara algún tipo de información importante para los cálculos necesarios en alguno de los documentos seleccionados se buscó un estudio similar al que se trabajó para completar la información y poder así realizar todos los cálculos.

9.2. ESTUDIO DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA

Al tener seleccionados los tres documentos, se procedió a estudiarlos cada uno para estar bien informada de los datos que eran necesarios saber para el estudio.

9.2.1. Primer Reactor

Del primer documento el artículo científico “tratamiento de aguas residuales textiles mediante un biorreactor de membrana” es importante mencionar que es una investigación a cargo de Lorena Salazar (Doctora en ingeniería ambiental), Martí Crespi Rosell (Doctor Ingeniero industrial), Roberto Salazar (Master en Ingeniería sanitaria y ambiental). El objetivo de este trabajo fue evaluar el proceso de tratamiento de aguas residuales textiles mediante un biorreactor de membrana y un proceso de fangos activados, bajo similares condiciones operativas y de calidad del efluente.

En este trabajo de investigación se diseña una muestra textil representativo para poner en marcha las plantas y evaluar sus eficiencias. El efluente lo componen por diferentes efluentes de una fábrica de la industria textil se simula el efluente de la industria de tintura y acabados de tejidos de algodón y sus mezclas.

Al obtener la muestra a utilizar se realiza un estudio de laboratorio para evaluar la composición del efluente textil y medir cada uno de los parámetros. Se observó que es un efluente con una gran cantidad de materia orgánica de difícil remoción, con gran cantidad de color y cloruros.

Luego de realizado el proceso mediante un biorreactor de membrana según los resultados obtenidos, se pudo observar que es un proceso con gran estabilidad, con una remoción de la materia orgánica en un promedio de 89%, remoción de solidos suspendidos totales de 95% y una remoción de color del 69%.

Como en esta investigación faltaba alguna información para completar la tabla para la realización de los balances de masa, lo que se hizo fue buscar en trabajos e investigaciones similares los porcentajes de eliminación de un biorreactor de membrana, para así tener la información más completa.

A continuación, se mostrarán las tablas con los datos que se usaron de esta investigación para el trabajo.

Tabla 6 Parámetros operativos

Parámetro	Unidades	PROCESO	
		FA	BRM
M.O			
DQO	mg/L	1500	1500
SSTLM	mg/L	3588	840
Qe	L/d	2	6
So	Mg DQO/L	1500	1500
TRH	d	2	9
V	L/d	4	40
F/M	KgDQO / KgSSVLM*d	0,2	0,2
SRT	d	43	45

Fuente: Editado de tesis biorreactor de membrana [36]

De la anterior tabla de los parámetros operativos de los procesos se tomó información que se necesitó como el caudal de entrada al reactor y el volumen del proceso BRM ya que este es el que se decidió trabajar.

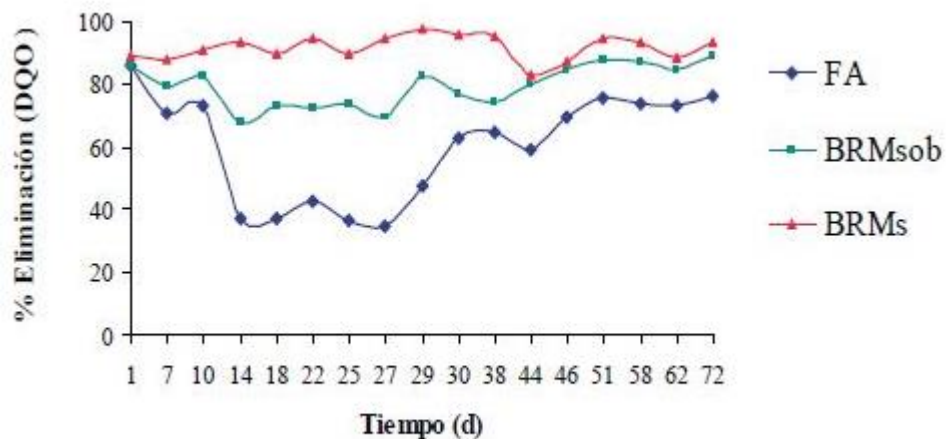
Tabla 7 Composición del efluente

Parámetro	Unidad	Efluente Textil
pH		10
Conductividad	Ms/m	1382
COT	mg/L	617
SST	mg/L	119
DQO	mg/L	1500
DBO5	mgO2/L	464
Color	Un. Hazen	2842
TENSIOACTIVOS		
Aniónicos	mg(LSNa)/L	0
Catiónicos	mg(Hy)/L	75
Fósforo	mg/L	1,6
Nitrógeno	mg/L	24
Grasas	mg/L	1,6
Cloruros	mg/L	1280

Fuente: Editada de documento biorreactor de membrana [36]

De la anterior tabla se tomaron las características del efluente textil usado en la investigación, en nuestro trabajo se usaron como datos de entrada para los balances de masas. Estos datos son de suma importancia ya que en los datos con los que se puede hacer la caracterización de la muestra tomada en el proceso de BRM, y para el trabajo es fundamental ya que sin estos datos de entrada no se puede hacer los balances de masa.

Figura 4 Porcentaje de eliminación DQO



Fuente: Documento Biorreactor de membrana [36]

De la anterior figura se pudo tomar el porcentaje máximo de eliminación de DQO en el proceso de BRM.

Tabla 8 Porcentaje de eliminación SST

	Afluente mg SST/L	Cantidad SST mg SST/L		
		FA2	BRMsob	BRM
MEDIA	110	66	72	5
MÍNIMA	121	18	68	5
MÁXIMA	100	102	78	5
DS	7	21	3	0
% ELIMINACIÓN	32	40	34	95

Fuente: Editado de documento Biorreactor de membrana [36]

De la anterior tabla se tomó el porcentaje de eliminación de Solidos Suspendidos Totales en el proceso de BRM en la planta.

Tabla 9 Porcentaje de eliminación de color en el proceso BRM

Eliminación Color	%
Fangos Activados	30
Biomasa BRM	55
BRM	69

Fuente: Documento Biorreactor de membrana [36]

De la anterior tabla se tomó el porcentaje de eliminación de color, el color es uno de los parámetros más importantes, ya que las aguas textiles se caracterizan por su elevado contenido de color, y en la mayoría de procesos la eliminación de este no es efectiva.

Para saber el porcentaje de eliminación de los demás parámetros se hizo búsqueda de diferentes documentos de procesos con Biorreactores de membrana para que los datos fueran más reales y el estudio fuera más realista.

9.2.2. Segundo Reactor

La tesis “Evaluación del proceso ozono – fenton para el tratamiento de aguas residuales de una industria textil” del año 2016 que tiene como autor a Santiago Correa Sánchez de la Universidad EAFIT de la ciudad de Medellín. El objetivo de este trabajo investigativo fue evaluar la efectividad del proceso ozono – fenton como tratamiento de aguas residuales de la industria textil.

En esta investigación se empleó reactivo de Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$) para el tratamiento del agua residual, para la preparación de este reactivo se usó H_2O_2 al 30% y FeSO_4 .

Los reactores tenían capacidad de 200 ml y agitación a 300 rpm.

Figura 5 Montaje del reactor Ozono - Fenton

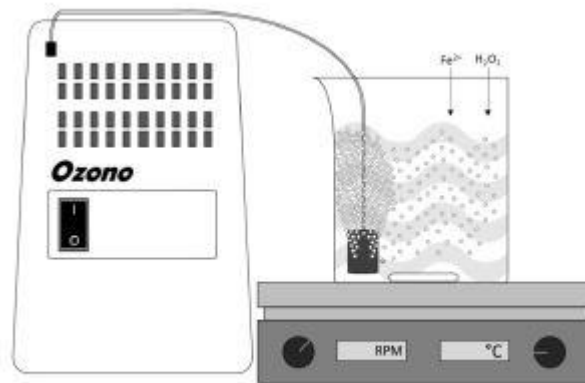


Figura 2.1. Montaje del proceso O_3/Fenton

Fuente: Tesis ozono [37]

El agua residual textil utilizada en esta investigación fue recolectada de un efluente resultante de la industria textil, que tiene alta coloración azul, la muestra fue refrigerada a 4°C durante el desarrollo de los diferentes experimentos.

Tabla 10 Caracterización de agua proceso Ozono - Fenton

Parámetro	Unidad	Magnitud
Sólidos totales	g/L	2,28
pH		6,09
Conductividad	mS/cm	3,49
Turbidez	NTU	191
DQO	mg/L	870
DBO	mg/L	92
DBO/DQO		0,105
COT	mg/L	184

Fuente: Editado de Tesis Ozono [37]

Con la anterior tabla se pudo obtener los parámetros de entrada del proceso ozono – fenton.

Tabla 11 Características del efluente después del tratamiento

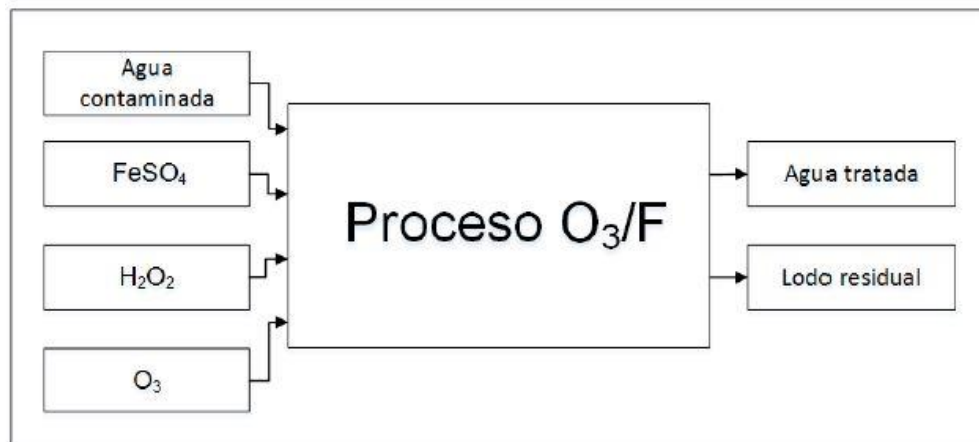
Parámetro	Unidad	Magnitud
Color		Transparente
pH		3,6
Conductividad	mS/cm	4,33
DQO	mg/L	305
DBO	mg/L	70
COT	mg/L	52

Fuente: Editado de Tesis Ozono [37]

De la anterior tabla se tomaron los datos de salida del proceso ozono – fenton.

La capacidad de la planta será de 400 m³/día trabajando en batch.

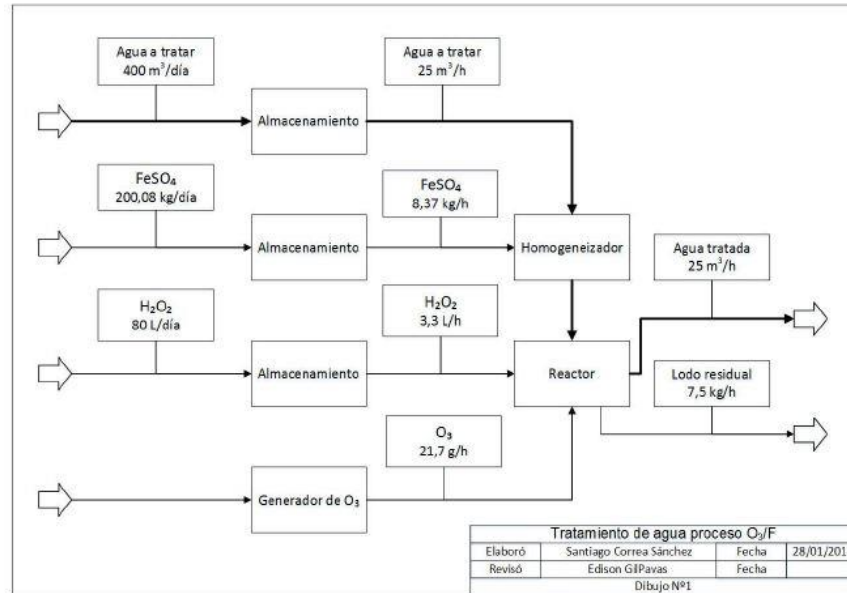
Figura 6 Entradas y salidas del proceso Ozono - fenton



Fuente: Tesis Ozono [37]

En el anterior diagrama se puede ver mejor el proceso con sus entradas y salidas con una visión general, se puede observar las entradas correspondientes a los insumos y el efluente a tratar, así como las salidas con el agua tratada y el lodo residual.

Figura 7 Esquema del proceso Ozono - Fenton



Fuente: Tesis Ozono [37]

En la anterior imagen se observó las operaciones principales del proceso, se pudo tomar información de la dosis de cada uno de los insumos que se usó.

Figura 8 Datos del reactor Ozono - Fenton

Agitador	Unidad	R - 100
Diámetro	m	0,6654
Tipo		Disco de 6 palas
Potencia	W	4,7
Reactor		R - 100
Material		PEAD
Diámetro	m	1,99
Largo	m	9,98
Volumen	m ³	31
Generador de O₃		G - 100
Material		ss
Capacidad	g/h	50
Potencia	Kw	0,53
Modelo		QJ-8010K 50G
Proveedor		Quanju Technology

Fuente: Editado de Tesis Ozono [37]

De la anterior imagen se pudo obtener información importante, como la potencia que se necesitó en cada uno de los procesos, las dimensiones del reactor y material de cada uno.

9.2.3. Tercer Reactor

La tesis de maestría “degradación de un efluente textil real mediante procesos fenton y foto – fenton que tiene como autor a José Blanco Jurado del año 2009. El objetivo de esta tesis fue el estudio de un Proceso de Oxidación Avanzada basado en foto – fenton ($UV/Fe^{2+} / (H_2O_2)$), para el tratamiento de una muestra de agua residual de una empresa textil.

La empresa seleccionada para realizar los tratamientos está centrada en la tintura de fibras sintéticas.

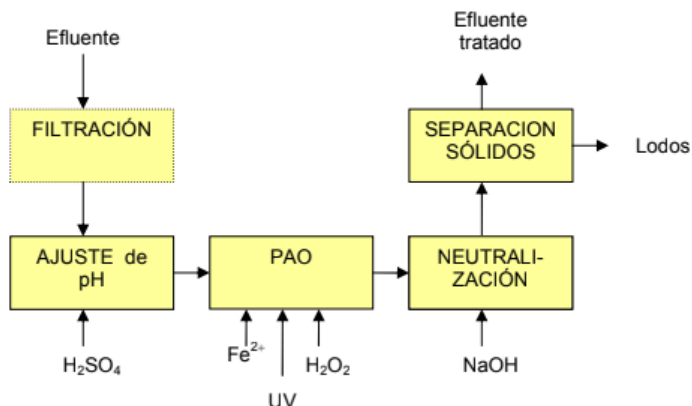
Tabla 12 Datos del reactor Foto - fenton

REACTOR		
Volumen	L	2
Diámetro	cm	15
Altura	cm	20
Material		Cuarzo
CAMISA DE REFRIGERACIÓN		
Diámetro externo	cm	18
Diámetro interno	cm	15
Material		Cuarzo
LÁMPARAS		
Marca		Philips
Potencia	W	25
AGITADOR		
Marca		IKA
Rango de agitación	rpm	100 - 700

Fuente: Editado de Tesis Foto – fenton [38]

De la anterior tabla se pudo sacar información acerca del reactor, del material de este y el volumen. También se encontró la potencia de cada una de las lámparas de radiación ya que es un dato importante para los balances de energía.

Figura 9 Esquema del procedimiento Foto - Fenton



Fuente: Tesis Foto – Fenton [38]

De la anterior figura se pudo observar de forma más clara en el proceso de PAO los insumos que se le adicioneo al reactor para realizar los procesos.

Tabla 13 Caracterización del agua proceso Foto - Fenton

PARÁMETRO	ENTRADA PROCESO	UNIDADES	REDUCCIÓN (%)
Parámetros generales			
pH	7,5		
Sólidos suspendidos	36,05	mg/L	99,99
Turbidez	65,75	NTU	99,68
Indice de color	1,485	1/cm	98,58
Parámetros orgánicos e inorgánicos			
DQO	1560	mg/L	78,85
COT	390,4	mg/L	75,3
Compuestos aromáticos	3,534	abs	98,3
Métales			
Fe (total)	mg/L	0,034	

Fuente: Editado de Tesis Foto – Fenton [38]

De la anterior tabla se obtuvieron los valores de los porcentajes de eliminación de cada uno de los parámetros luego del proceso foto – fenton.

9.3. CÁLCULOS DE LOS BALANCES DE MASA Y ENERGÍA

Un balance de masa o de materiales es una secuencia de cálculos que permite llevar la cuenta de todas las sustancias que intervienen en un proceso de transformación, satisfaciendo la ley de la conservación de la masa, la cual establece que la materia se transforma, pero no se crea ni se destruye. Un balance de materia es, pues, una contabilidad de los materiales que toman parte del proceso. (García [2018]).

Las sustancias pueden entrar, salir, producirse, acumularse o consumirse durante el proceso. Se entiende por proceso cualquier conjunto de operaciones que produce una transformación física o química en una sustancia o en un grupo de sustancias. Las sustancias que ingresan en un proceso se les llama alimentación o entrada, y las que emergen del proceso se llaman producto o salida.

Para realizar los cálculos de balances de masa, es necesario recolectar información bien sea de las cantidades (en masa, en moles o en volumen) de las sustancias participantes o de los flujos de las mismas (velocidades másicas, molares o volumétricas), como también de las composiciones de las mezclas y de las condiciones de operación principalmente las presiones y las temperaturas. (García [2018]).

Para los cálculos de balances de masa y energía, se usó una hoja de Excel para cada uno de los tipos de reactores seleccionados.

Primero se realizó el balance de masa y energía del proceso de Biorreactor de Membrana, se organizaron los datos, se miró cada uno de los parámetros que nos daba el documento de referencia y estos se tomaban como datos de entrada, el caudal se puso en unidades de L/día para así multiplicar cada dato de entrada por el caudal y obtener la carga másica de entrada en unidades (mg/día).

Luego de esto al tener el porcentaje de remoción de cada uno de los parámetros se calculó los datos de salida del reactor, haciendo el mismo proceso de multiplicar este valor por el caudal para obtener la carga másica de salida.

Estos datos de la carga másica de entrada y la carga másica de salida, son los datos que se ingresaron al programa GaBi.

9.4. MODELACIÓN DEL SISTEMA DE ENTRADA Y SALIDA DE LOS REACTORES

En la modelación de los sistemas se hizo uso del software GaBi para así hacer los análisis de ciclo de vida con los datos de entrada y de salida del reactor, también los balances de energía.

Como ya sabemos el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de un producto, servicio o actividad facilita la evaluación del impacto ambiental que dicho producto, servicio o actividad genera sobre el medio ambiente durante todo el proceso, es decir, desde la obtención de la materia prima, el transporte de dicha materia prima, la elaboración del producto, durante su utilización y finalmente, a la hora de ser desechado.

El ACV permite obtener un modelo simplificado de un sistema de producción y de los impactos ambientales asociados; sin embargo, no pretende entregar una representación total y absoluta de cada interacción ambiental. A pesar de postular una cobertura sobre todo el ciclo de vida de un producto, en muchos casos resulta difícil abarcar todas las actividades desde la “cuna a la tumba”, por lo que se debe definir claramente el sistema requerido para que el producto cumpla con una determinada función. («Análisis del Ciclo de Vida» [2017]).

9.5. ANALISIS DE CICLO DE VIDA

9.5.1. Unidad funcional

La unidad funcional definida en el ACV es el caudal que maneja cada uno de los reactores estudiados, ya que todos los balances de masa de cada proceso están en función del caudal. Y este valor es el que se promedió para poder realizar el comparativo de impacto ambiental entre cada uno de los procesos.

9.5.2. Categorías de impacto

Las categorías de impacto mostradas en la tabla son basadas en algunas tesis o documentos [12] que también realizaron estudios del análisis de ciclo de vida. [41].

Tabla 14 Categorías de impacto

CATEGORIA DE IMPACTO	UNIDAD	DEFINICIÓN
Potencial de calentamiento global (GWP)	<i>Kg CO₂ - Eq</i>	La radiación generada por la energía que es redistribuida por la atmosfera, es absorbida por los gases existentes provocando el calentamiento del planeta.
Potencial de agotamiento de los recursos abióticos (ADP)	<i>Kg Sb - Eq</i>	Disminución de la disponibilidad de los recursos naturales.
Potencial de agotamiento del ozono (ODP)	<i>Kg CFC-11 - Eq</i>	Formación de compuestos químicos reactivos tales que propiciarían la destrucción de la capa de ozono.
Potencial de acidificación (AP)	<i>Kg SO₂ - Eq</i>	Deposición de ácidos resultantes de la liberación de óxidos de nitrógeno y sulfuro en la atmosfera.
Potencial de eutrofización (EP)	<i>Kg PO₃ - Eq</i>	Se produce cuando los nutrientes, nitrógeno y fosforo se acumulan en los ecosistemas acuáticos, su incremento puede representar un aumento de la producción de biomasa.
Toxicidad humana	<i>CTUh</i>	Cubre los impactos sobre la salud humana de sustancias toxicas presentes en el ambiente.
Potencial de oxidación fotoquímica (POP)	<i>Kg de etileno (C₂H₄)</i>	Bajo la influencia de la radiación solar, los óxidos de nitrógeno reaccionan con compuestos orgánicos volátiles produciendo ozono troposférico.

<i>Continuación tabla 14</i> <i>Categorías de</i> <i>impacto</i>		
Agotamiento fósil	<i>Kg oil - Eq</i>	Cantidad de combustibles fósiles extraídos, basado en su calor de combustión.
Eutrofización marina	<i>Kg N - Eq</i>	Cubre todos los potenciales impactos en el ambiente por los niveles excesivos de macronutrientes
Formación de oxidación Fotoquímica	<i>Kg of NMVOC</i>	Es la formación de compuestos químicos reactivos tales como el ozono por la acción de la luz sobre ciertos contaminantes primarios en el aire.
Formación de material Particular	<i>Kg PM10-Eq</i>	Es la suma de la formación de todos los materiales particulados sólidos y líquidos en el aire los cuales son peligrosos.
Agotamiento de Agua	<i>m³</i>	Factor que representa el gasto de agua fresca.

Fuente: La autora

10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

10.1. CÁLCULOS DE LOS BALANCES DE MASA.

Para los cálculos de los balances de masa de cada uno de los procesos se utilizó una hoja de Excel para facilitar y tener más ordenados los datos.

10.1.1. Biorreactor de membrana

Tabla 15 Caudal del proceso BRM

Qe (L/d)	6000
----------	------

Fuente: La autora

En la tabla. se tiene el caudal del proceso en Litros/día ya que para hacer los cálculos de la carga másica se debe tener en esta unidad.

Tabla 16 Datos de entrada del proceso BRM

DATOS DE ENTRADA		% REMOCIÓN
DQO (mg/L)	1500	89
SST (mg/L)	119	95
COLOR	2842	69
NITROGENO (mg/L)	24	34
FOSFORO (mg/L)	1,6	40
DBO (mg O ₂ /L)	464	85,2

Fuente: La autora

En la tabla. Se tienen los datos de entrada del proceso BRM.

$$CARGA M\acute{A}SICA = CONCENTRACI\acute{O}N * CAUDAL$$

La anterior ecuación fue la que se utilizó para calcular la carga másica de entrada del proceso, obteniendo los siguientes valores.

Tabla 17 Carga másica de entrada del proceso BRM

CARGA MASICA (mg/d)
9000000
714000
17052000
144000
9600
2784000

Fuente: La autora

Al calcular los valores de la carga másica de cada uno de los parámetros, se procedió a calcular los valores de la carga másica con los datos de las salidas.

Tabla 18 Datos de salida proceso BRM

DATOS DE SALIDA	SOBRANTE
165	11
5,95	5
881,02	31
15,84	66
0,96	60
68,67	14,8

Fuente: La autora

Con los datos de la anterior tabla de los datos de salidas del proceso se hizo uso de la ecuación de la carga másica para hallar los valores de la carga másica de las salidas del proceso.

Tabla 19 Carga másica de las salidas del proceso BRM

CARGA MASICA (mg/d)
990000
35700
5286120
95040
5760
412020

Fuente: La autora

Luego de tener calculadas las cargas másicas de cada parámetro del proceso de BRM se procedió a calcular los insumos que se usaron en esta investigación.

Tabla 20 Insumos del proceso BRM

INSUMOS		
Aire (L/h)	20 - 200	100
Aire (L/min)	1,666666667	
	0,1	
Aire (Nm3/d)	2,4	

Fuente: La autora

En este proceso el único insumo que se tuvo fue el aire en la tabla. se hizo una conversión para pasar el aire a las unidades (Nm3/d) ya que esta unidad es en la que se debe ingresar al software GaBy este insumo.

Es importante recalcar que en este proceso no hay expulsión de biomasa.

10.1.2. Proceso ozono – fenton

Se realizó el balance de masas del proceso ozono – fenton con los datos que se tienen.

Tabla 21 Caudal del proceso ozono - fenton

Caudal (m3/d)	400
(L/s)	4,62962963
L/d	400000

Fuente: La autora

Se tiene el valor del caudal del proceso ozono – fenton en m3/d y se hizo la conversión necesaria para pasar las unidades a L/d para poder hacer los cálculos de la carga másica en las unidades consistentes.

Tabla 22 Datos de entrada del proceso ozono - fenton

DATOS DE ENTRADA		% REMOCIÓN
Solidos totales (mg/L)	2280	81
pH	6,09	52
Conductividad (mS/cm)	3,49	
Turbidez (NTU)	191	70,4
DQO (mg/L)	870	35,05
DBO 5 (mg/L)	92	76,09
COT (mg/L)	184	28,26
DBO/DQO	0,105	

Fuente: La autora

En la tabla. se tienen los parámetros de entrada del proceso ozono – fenton y los porcentajes de remoción de cada parámetro.

Se usó la ecuación de la carga másica para saber los valores de carga másica de entrada del proceso ozono - fenton, obteniendo los siguientes valores.

Table 23 Carga másica de entrada del proceso ozono - fenton

CARGA MÁSCA (mg/d)
912000000
2436000
1396000
76400000
348000000
36800000
73600000

Fuente: La autora

Al calcular los valores de la carga másica de cada uno de los parámetros, se procedió a calcular los valores de la carga másica con los datos de las salidas.

Tabla 24 Datos de salida proceso Ozono - Fenton

DATOS DE SALIDA	SOBRANTE
430	19
3,6	48
4,33	100
56,54	29,6
305	64,95
70	23,91
52	71,74

Fuente: La autora

Con los datos de la anterior tabla de los datos de salidas del proceso se hizo uso de la ecuación de la carga másica para hallar los valores de la carga másica de las salidas del proceso.

Tabla 25 Carga másica de las salidas del proceso Ozono - Fenton

CARGA MÁSIKA (mg/d)
172000000
1440000
1732000
22616000
122000000
28000000
20800000

Fuente: La autora

Luego de tener calculadas las cargas másicas de cada parámetro del proceso de ozono - fenton se procedió a calcular los insumos -reactivos que se usaron en esta investigación.

Tabla 26 Reactivos usados en el proceso Ozono - Fenton

REACTIVOS USADOS	
O3 (Kg/d)	5,208
H2O2 (Kg/d)	80
FeSO4 (Kg/d)	200,08

Fuente: La autora

En esta investigación se hizo uso de tres reactivos, el ozono con una dosis de 21,7 g/h, peróxido de hidrógeno 80 l/d y sulfato de hierro 200,08 kg/d. Estos valores de los insumos que se usaron en la investigación también se ingresan en el software GaBy para el análisis de ciclo de vida.

Tabla 27 Lodo producido en el proceso Ozono - fenton

Lodo residual (Kg/h)	7,5
----------------------	-----

Fuente: La autora

En este proceso de ozono – fenton si se tuvo lodo residual de 7,5 Kg/h este es un valor muy importante en la modelación en el software, ya que este lodo residual genera alto impacto ambiental.

Tabla 28 Energía requerida del proceso Ozono - fenton

ENERGIA	
Agitador (w)	4,7
Generador de O3 (Kw)	0,53

Fuente: La autora

La tabla anterior muestra la energía que se usó en el proceso ozono – fenton, este balance de energía también se ingresa en el software GaBy.

Tabla 29 Datos generales del reactor del proceso Ozono - Fenton

DATOS DEL REACTOR	Batch
Volumen (m3)	31
Agitación (rpm)	300
Material	PEAD
Diametro (m)	1,99
Largo (m)	9,98

Fuente: La autora

Por último, se muestra la tabla en la que se ven datos generales del reactor que se usó en la investigación del proceso ozono – fenton.

10.1.3. Proceso foto – fenton

Se realizó el balance de masas del proceso foto – fenton con los datos que se tienen.

Tabla 30 Caudal del proceso Foto - fenton

Qe (m ³ /d)	250
Qe (L/s)	2,893518519
Qe (L/d)	250000

Fuente: La autora

Se tiene el valor del caudal del proceso foto – fenton en m³/d y se hizo la conversión necesaria para pasar las unidades a L/d para poder hacer los cálculos de la carga másica en las unidades consistentes.

Tabla 31 Datos de entrada del proceso Foto - Fenton

DATOS DE ENTRADA		% REMOCIÓN
pH	7,29	
Conductividad mS/cm	3953	
Solidos Suspendidos (mg/L)	36,05	99,9
Turbidez (NTU)	65,75	99,68
Color	1,485	98,58
DQO (mgO ₂ /L)	1560	78,85
COT (mg/L)	390,4	75,3
Compuestos aromaticos UV (abs)	3,534	98,3

Fuente: La autora

En la tabla. se tienen los parámetros de entrada del proceso foto – fenton y los porcentajes de remoción de cada parámetro.

Se usó la ecuación de la carga másica para saber los valores de carga másica de entrada del proceso foto - fenton, obteniendo los siguientes valores.

Tabla 32 Carga másica de entrada del proceso Foto - fenton

CARGA MÁSCICA (mg/d)
1822500
988250000
9012500
16437500
371250
390000000
97600000
883500

Fuente: La autora

Al calcular los valores de la carga másica de cada uno de los parámetros, se procedió a calcular los valores de la carga másica con los datos de las salidas.

Tabla 33 Datos de salida proceso Foto - Fenton

DATOS DE SALIDA
7,5
5238
0,01
0,21
0,021
330
96,5
0,06

Fuente: La autora

Con los datos de la anterior tabla de los datos de salidas del proceso se hizo uso de la ecuación de la carga másica para hallar los valores de la carga másica de las salidas del proceso.

Tabla 34 Carga másica de las salidas del proceso foto - fenton

CARGA MÁSCICA (mg/d)
1875000
1309500000
2500
52500
5250
82500000
24125000
15000

Fuente: La autora

Luego de tener calculadas las cargas másicas de cada parámetro del proceso de foto - fenton se procedió a calcular los insumos - reactivos que se usaron en esta investigación.

Tabla 35 Reactivos usados en el proceso Foto - Fenton

REACTIVOS	DOSIS	
	kg/d	mg/d
Fe(II)	19192,9511	19192951116
H2O2	175935,385	1,75935E+11
H2SO4	45316,6901	45316690136

Fuente: La autora

En la tabla. se tiene los reactivos que se usaron en la investigación de foto – fenton, con una dosis de hierro de 19192,95 Kg/d, con una dosis de peróxido de hidrogeno de 175935,385 Kg/d, y una dosis de ácido sulfúrico de 45316,69 Kg/d. Se obtuvieron estos valores que se ingresaron en el software GaBi.

Tabla 36 Energía requerida del proceso Foto - Fenton

ENERGIA	
Potencia (W)	25
Número de lamparas	4
100	

Fuente: La autora

La tabla anterior muestra la energía que se usó en el proceso foto – fenton, este balance de energía también se ingresa en el software GaBi.

Tabla 37 Datos generales del reactor del proceso Foto - Fenton

DATOS DEL REACTOR	
Volumen (L)	2
Diametro (cm)	15
Altura (cm)	20
Material	Cuarzo

Fuente: La autora

Por último, se muestra la tabla en la que se ven datos generales del reactor que se usó en la investigación del proceso foto – fenton.

10.1.4. Promedio

Para realizar un comparativo entre los tres tipos de reactores seleccionados, se usó una hoja de Excel nueva para hacer un promedio de los tres caudales de entrada de cada uno de los tres procesos, con este caudal promedio se volvieron hacer los cálculos de las cargas másicas para poder realizar la comparación del ACV.

Tabla 38 Promedio del caudal de entrada

Qe (L/d)	Membrana	6000
	Ozono-Fenton	400000
	Foto-Fenton	250000
	Promedio	218666,6667

Fuente: La autora

Con este nuevo caudal promedio se volvió a calcular cada carga másica tanto de entrada como de salida de cada proceso.

Tabla 39 Cálculos de reactor de membrana con caudal promedio

MEMBRANA				
	Datos de entrada	Carga másica (mg/d)	Datos de salida	Carga másica (mg/d)
DQO	1500	328000000	165	36080000,0000
SST	119	26021333,33	5,95	1301066,6667
COLOR	2842	621450666,7	881,02	192649706,6667
NITROGENO	24	5248000	15,84	3463680,0000
FOSFORO	1,6	349866,6667	0,96	209920,0000
DBO	464	101461333,3	68,67	15015840,0000

Fuente: La autora

Table 40 Cálculos de reactor ozono - fenton con caudal promedio

OZONO - FENTON				
	Datos de entrada	Carga másica (mg/d)	Datos de salida	Carga másica (mg/d)
SOLIDOS TOTALES	2280	498560000	430	94026666,6667
pH	6,09	1331680	3,6	787200,0000
CONDUCTIVIDAD	3,49	763146,6667	4,33	946826,6667
TURBIDEZ	191	41765333,33	56,54	12363413,3333
DQO	870	190240000	305	66693333,3333
DBO	92	20117333,33	76,09	16638346,6667
COT	184	40234666,67	52	11370666,6667

Fuente: La autora

Tabla 41 Cálculos de reactor foto - fenton con caudal promedio

FOTO - FENTON				
	Datos de entrada	Carga másica (mg/d)	Datos de salida	Carga másica (mg/d)
pH	7,29	1594080	7,5	1640000
CONDUCTIVIDAD	3953	864389333,3	5238	1145376000
SOLIDOS SUSPENDIDOS	36,05	7882933,333	0,01	2186,666667
TURBIDEZ	65,75	14377333,33	0,21	45920
COLOR	1,485	324720	0,021	4592
DQO	1560	341120000	330	72160000
COT	390,4	85367466,67	96,5	21101333,33
C. AROMATICOS	3,534	772768	0,06	13120

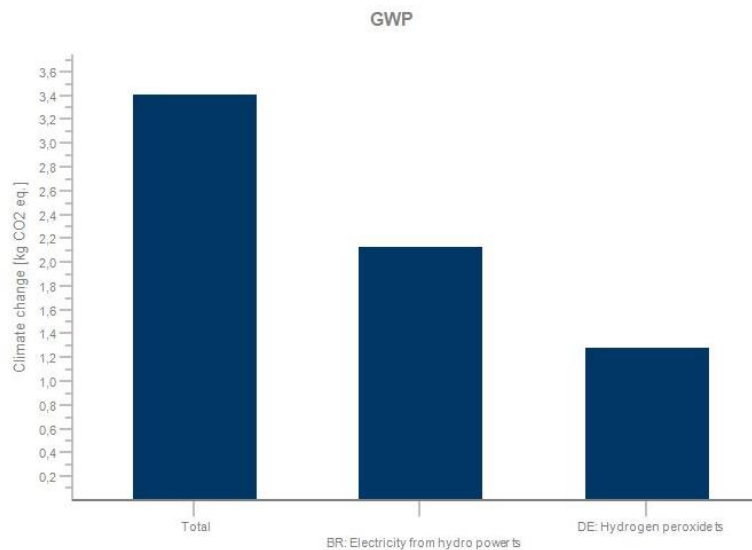
Fuente: La autora

10.2. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS REACTORES.

Después de que se ingresaron todos los datos de cada uno de los tres tipos de reactores, se observaron cada una de las gráficas arrojadas de Análisis de Ciclo de vida para así sacar los datos más relevantes y representarlos en graficas donde se pudiera comparar todos los tres procesos y así hacer una evaluación de impacto ambiental más real.

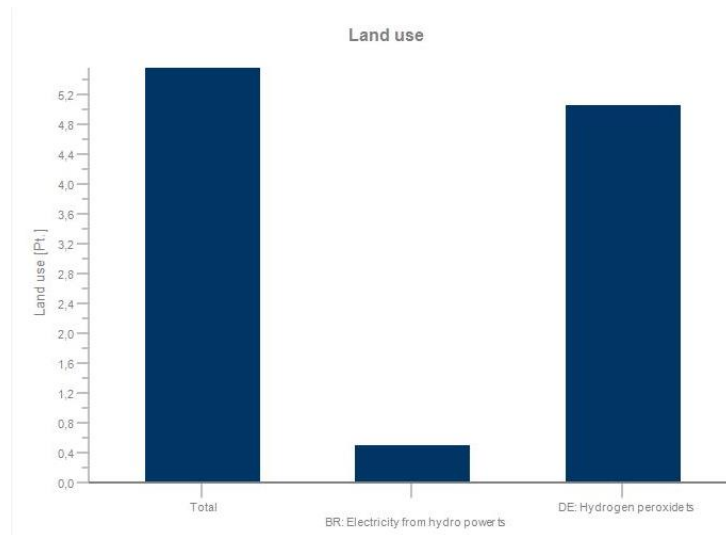
A continuación, se mostrarán algunas de las gráficas que arrojó como resultado de cada uno de los procesos el software GaBi.

Figura 10 Grafica potencial de calentamiento global. Reactor ozono - fenton



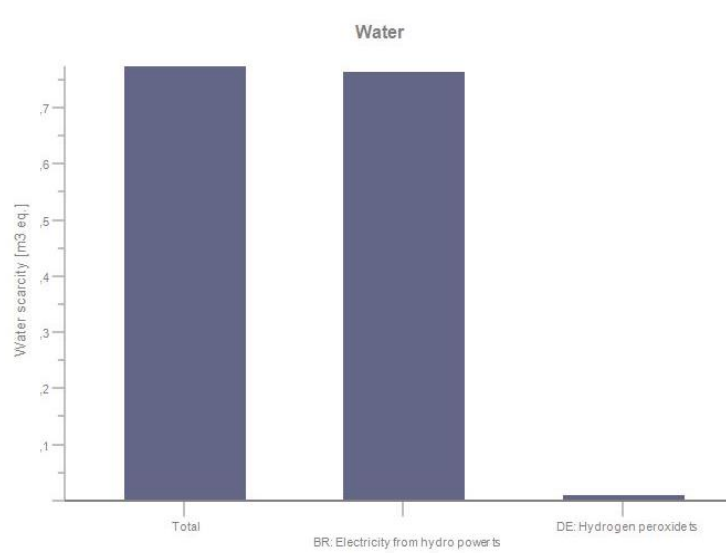
Fuente: software GaBi Education

Figura 11 Gráfica uso del suelo. Reactor Ozono - Fenton



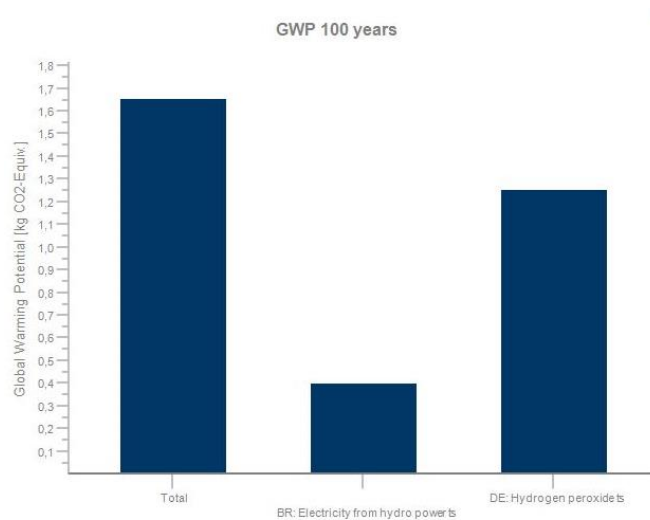
Fuente: software GaBi Education

Figura 12 Gráfica de agotamiento del agua



Fuente: software GaBi Education

Figura 13 Gráfica potencial de calentamiento global. Reactor Foto - Fenton



Fuente: software GaBi Education

En las anteriores graficas se ve algunas de las categorías de impacto que se evaluaron en el software de cada uno de los reactores.

De las figuras anteriores se puede destacar de la *figura 10. Gráfica potencial de calentamiento global. Reactor ozono – fenton*, se puede ver que en el reactor de ozono – fenton en la categoría de impacto de potencial de calentamiento global se ve más afectada por la electricidad que se implementa en el reactor, que por los insumos que se tienen en este.

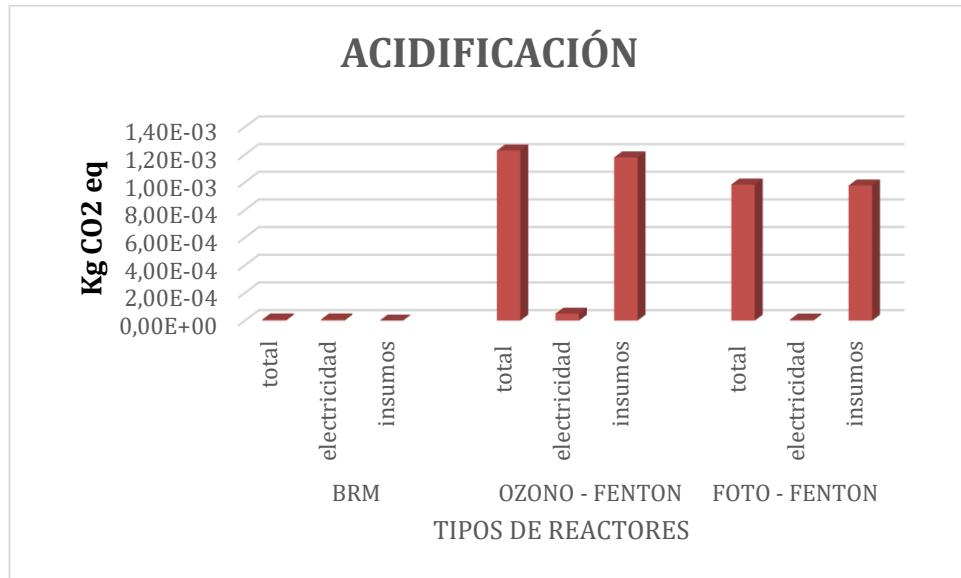
En la *figura 13. Gráfica potencial de calentamiento global. Reactor Foto – Fenton*, se puede evidenciar que en esta categoría en el reactor foto – fenton el impacto se da en su totalidad por el uso de insumos que, por la electricidad usada en el reactor, los reactivos son en una gran mayoría los causantes del calentamiento global en el mundo ya que este se da por las emisiones que se acumulan en el aire.

Anteriormente se muestran las gráficas del diseño de reactor ozono – fenton ya que en este proceso se puede ver más en detalle una variabilidad en los resultados de cada una de las categorías de impacto.

11. EVALUACIÓN IMPACTO AMBIENTAL

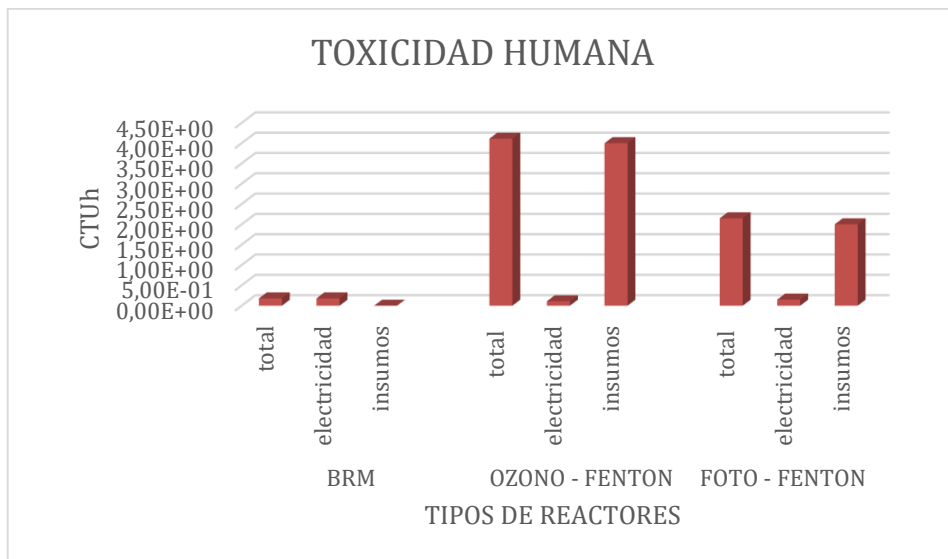
En este ítem se tomaron los datos arrojados del software, para así poder realizar las gráficas y realizar las respectivas comparaciones entre los tres tipos de reactor.

Figura 14 Grafica comparativo potencial de acidificación



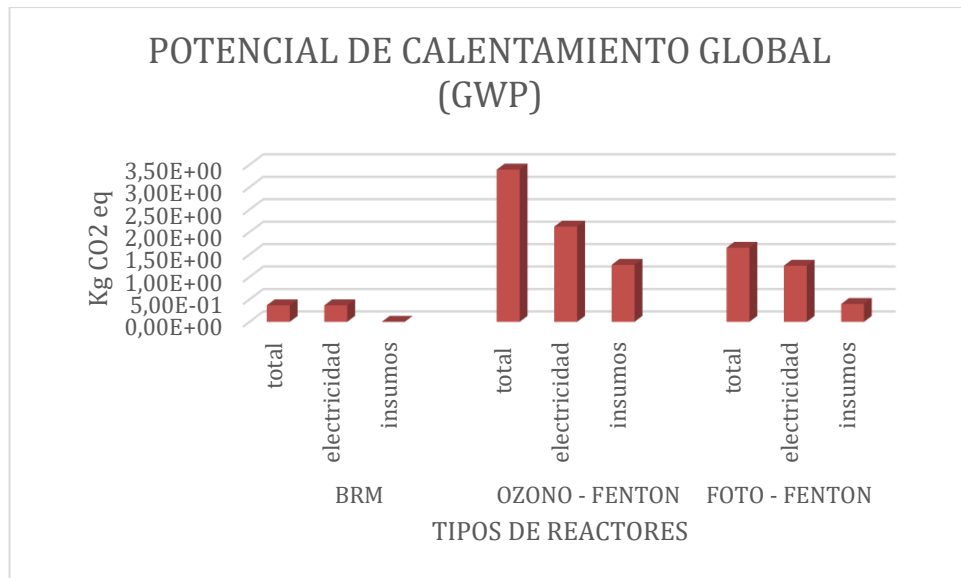
Fuente: La autora

Figura 15 Gráfica comparativo toxicidad humana



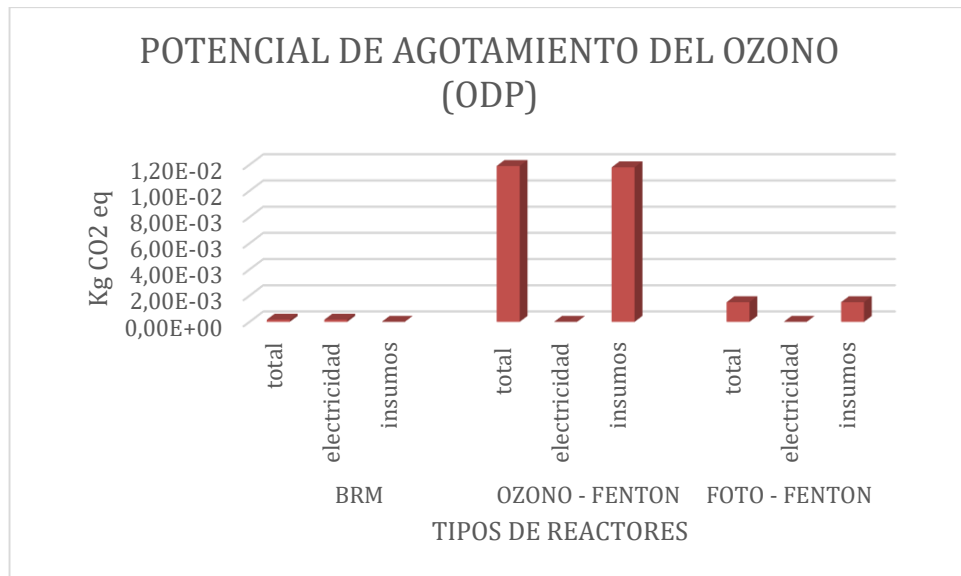
Fuente: La autora

Figura 16 Gráfica comparativo Potencial de calentamiento global (GWP)



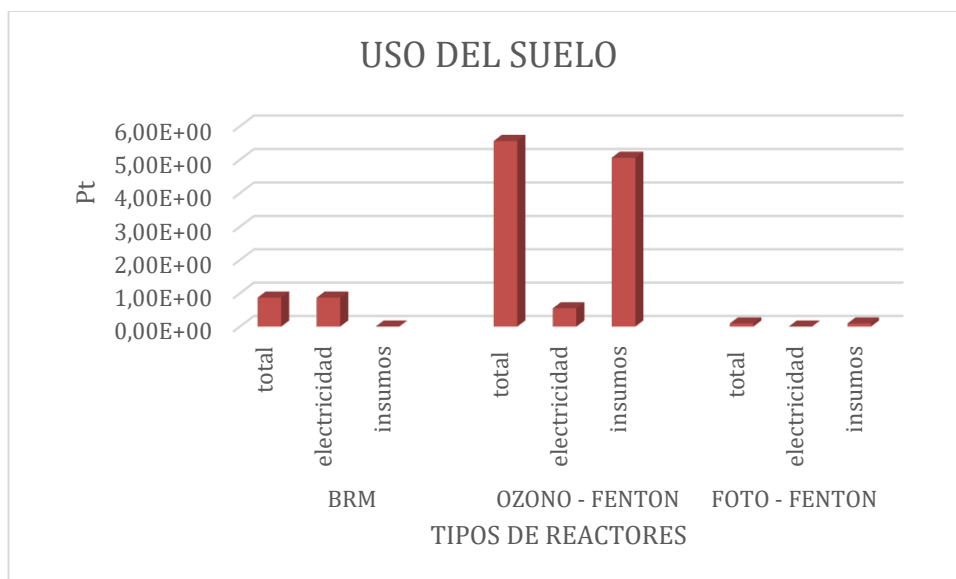
Fuente: La autora

Figura 17 Gráfica comparativo potencial de agotamiento del ozono (ODP)



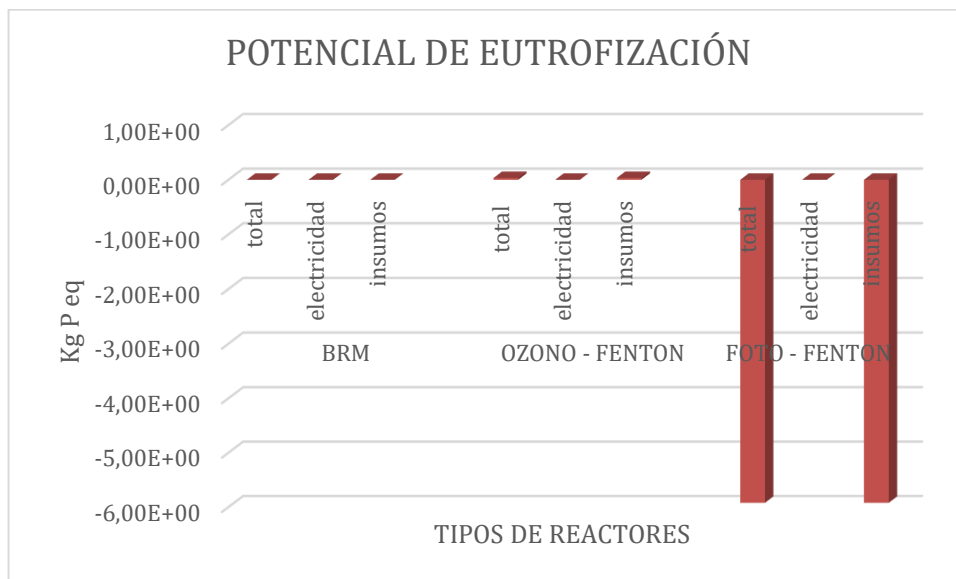
Fuente: La autora

Figura 18 Gráfica comparativo uso del suelo



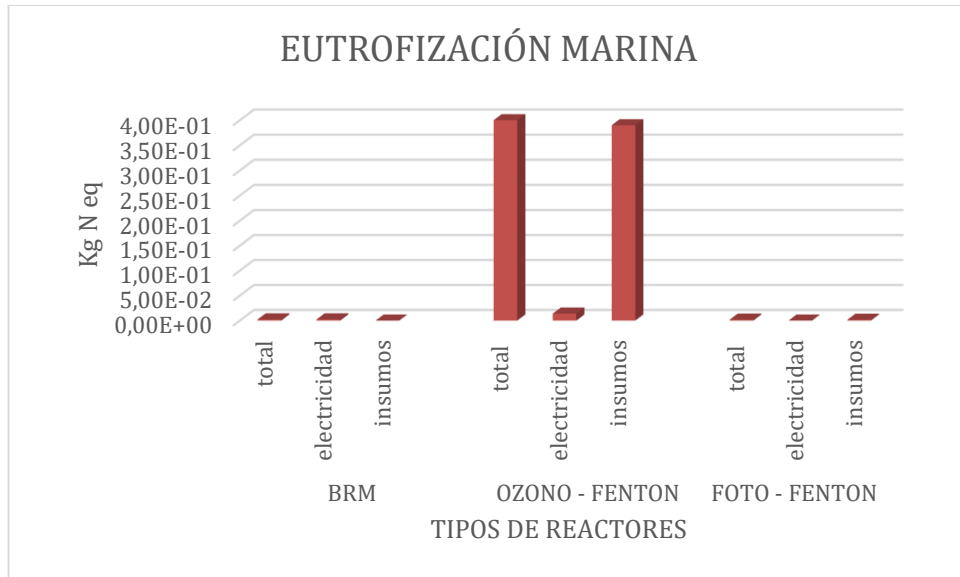
Fuente: La autora

Figura 19 Gráfica comparativo potencial de eutrofización



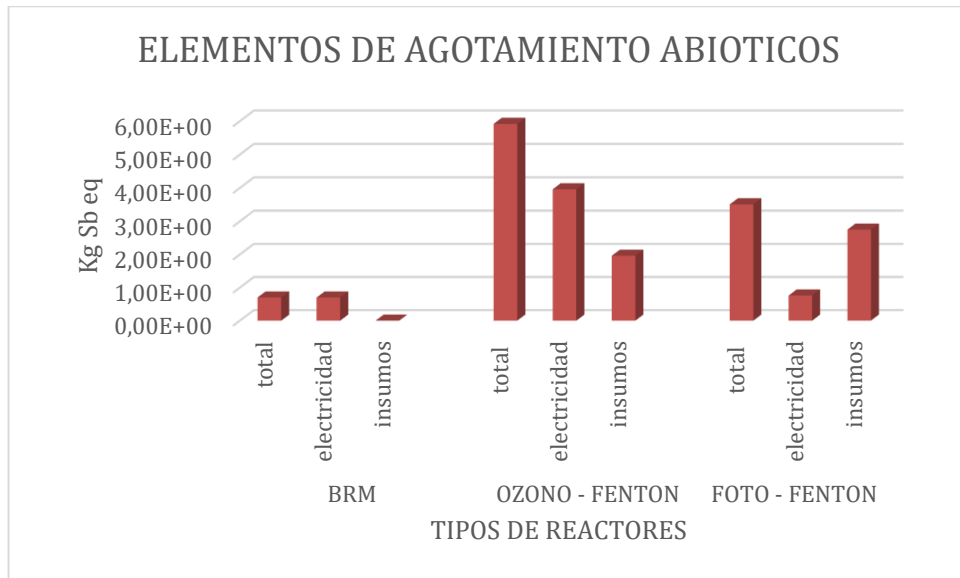
Fuente: La autora

Figura 20 Gráfica comparativo eutrofización marina



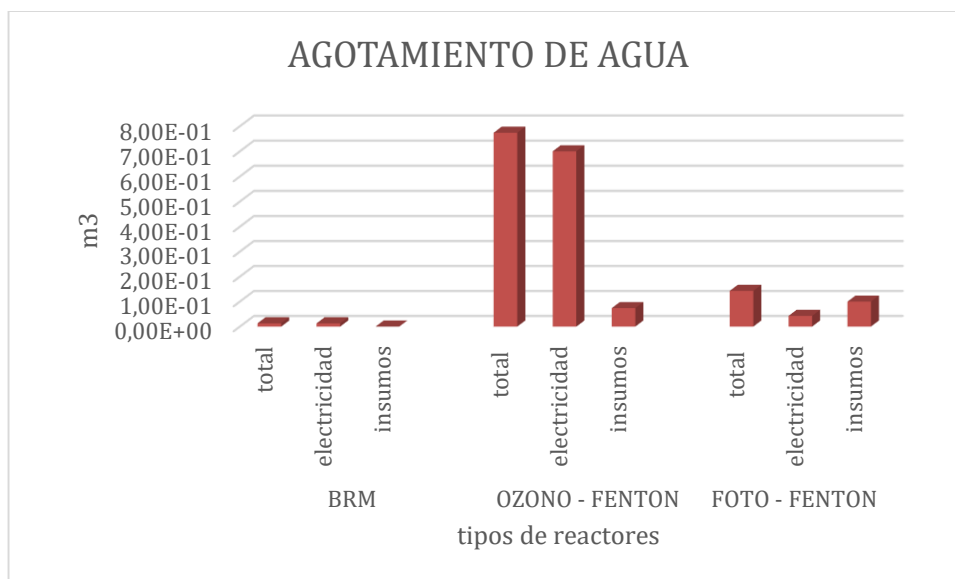
Fuente: La autora

Figura 21 Gráfica comparativo elementos de agotamiento abióticos



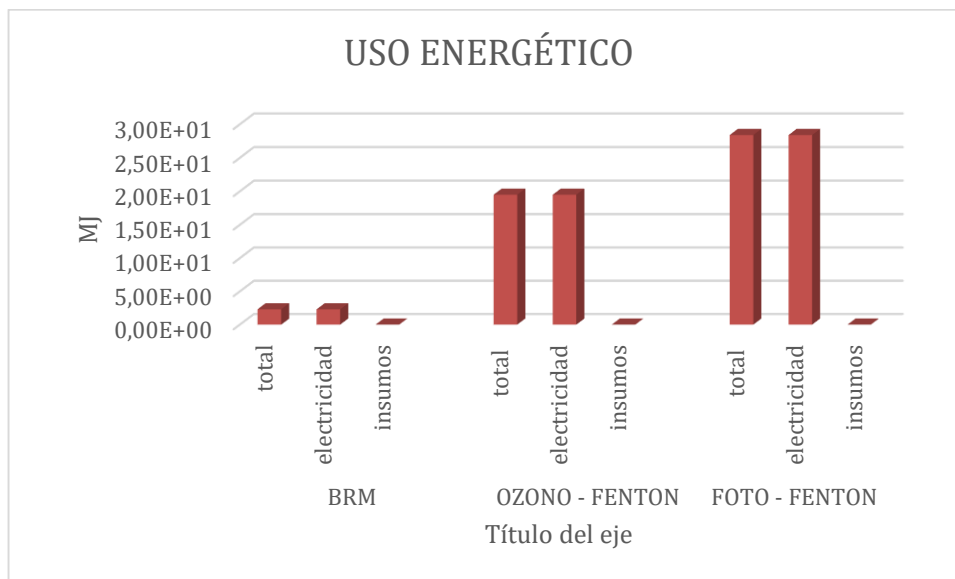
Fuente: La autora

Figura 22 Gráfica comparativo agotamiento de agua



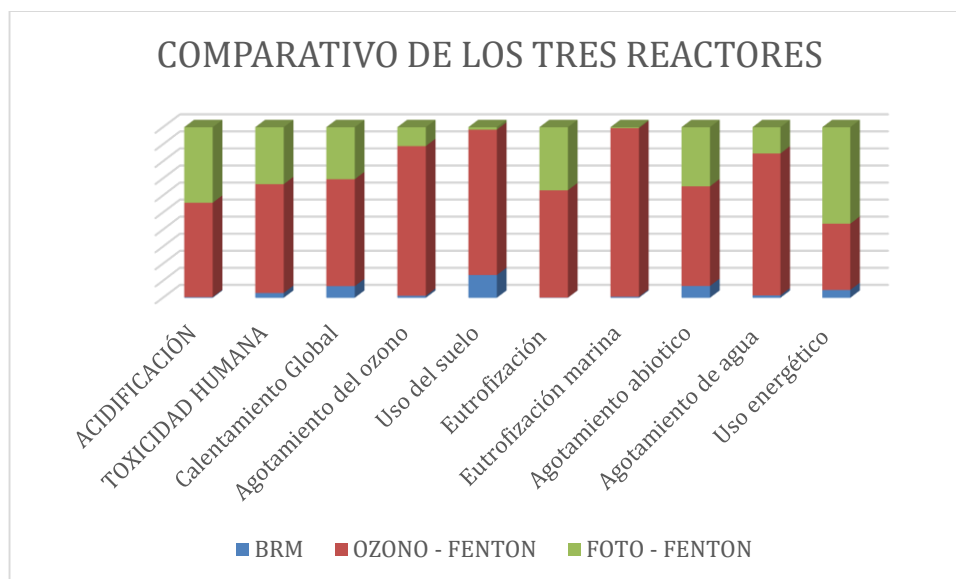
Fuente: La autora

Figura 23 Gráfica comparativo uso energético



Fuente: La autora

Figure 24 Gráfica comparativo de los tres reactores



Fuente: La autora

Como se pudo observar en las gráficas anteriores, se realizó un análisis comparativo de cada una de las categorías de impacto ambiental entre los tres tipos de reactores seleccionados Biorreactor de membrana, Reactor de ozono – fenton y reactor foto – fenton con los datos arrojados en el software GaBi.

En la *figura 14. Comparativo Potencial de acidificación* se puede ver que en el diseño de reactor de ozono – fenton se ve un valor mucho más elevado con respecto a los dos otros tipos de reactor, el potencial de acidificación se entiende como la deposición de ácidos resultantes de la liberación de óxidos y sulfuros en la atmosfera. Con esto se puede deducir que en el montaje del reactor de ozono como se necesitan insumos como el sulfato de hierro esto puede ser una de las razones por las cuales en esta categoría de impacto el diseño de reactor de ozono tenga mayor impacto, el reactor foto – fenton está por debajo de este, en este diseño también se utilizaron algunos insumos como el peróxido de hidrogeno, y el Biorreactor de membrana el valor es prácticamente cero, ya que en este diseño el único insumo usado fue el aire.

En la *figura 15. Comparativo de toxicidad humana* se evidencia que el diseño del reactor de ozono – fenton tiene mayor impacto, el reactor de foto – fenton genera también un impacto un poco más bajo, y el Biorreactor de membrana tiene un valor

muy bajo con respecto a los otros dos diseños. La toxicidad humana se refiere a los impactos sobre la salud humana de sustancias tóxicas presentes en el ambiente, estos problemas de salud pueden ser problemas en la piel, en los ojos, o pueden ser más graves como cáncer. En este resultado es importante recalcar el uso de insumos en los diseños de ozono y foto fenton frente al biorreactor de membrana.

En la *figura 16. Comparativo Potencial de calentamiento global (GWP)* se observa que el valor arrojado de ozono y foto fenton es muy similar, aunque es un poco mayor el del reactor de ozono, en estos se ve que se genera el mayor impacto por la electricidad usada en los diseños, el valor de Biorreactor de membrana no es tan significativo. Se entiende como potencial de calentamiento global a la radiación generada por la energía que es redistribuida por la atmósfera que es absorbida por los gases existentes provocando el calentamiento global.

En la *figura 17. Comparativo Potencial de agotamiento del ozono (ODP)* es notorio que el diseño de reactor que más impacto genera es el de ozono, y este es generado por los insumos. En los otros dos diseños el valor es prácticamente cero. El potencial -de agotamiento del ozono se debe a la formación de compuestos químicos reactivos tales que propiciarían la destrucción de la capa de ozono.

En la *figura 18. Comparativo uso del suelo* según los resultados de la gráfica el diseño de reactor de ozono nuevamente es el que genera mayor impacto, seguido del diseño del biorreactor de membrana, y en esta categoría el valor del diseño de foto – fenton es muy cercano a cero.

En la *figura 23. Comparativo uso energético* se puede evidenciar que acá el diseño que más impacto genera es el de foto – fenton, seguido por el diseño de ozono y por último el Biorreactor de membrana.

En la *figura 24. Gráfica comparativa de los tres reactores* se puede ver que al poner los totales de las categorías de impacto de cada uno de los reactores que dio de resultado en el Análisis de Ciclo de Vida en una sola gráfica el reactor que más genera un impacto ambiental es el diseño de reactor de ozono – fenton, seguido por el diseño de reactor foto – fenton, y el que menos generó impacto ambiental fue el Biorreactor de membrana.

De esto se puede decir que a lo largo del estudio que se realizó a cada uno de los tres diseños de reactor, el reactor Ozono – fenton era el que más reactivos usaba en el montaje, al tener una mayor cantidad de insumos se genera un mayor impacto ambiental en las diferentes categorías. El biorreactor de membrana es el que menos genera impacto ambiental, ya que en este diseño el único insumo usado era el aire.

En categorías de impacto como la eutrofización marina y el uso del suelo el diseño de reactor de ozono – fenton genera prácticamente el 100% del impacto frente a los dos otros tipos de reactores, siendo estas dos categorías las que se ven más impactadas por el diseño ozono – fenton.

En la única categoría en la que el proceso ozono – fenton no genera el mayor impacto es en la categoría de uso energético, en esta se tiene que el proceso foto – fenton aporta un impacto de más del 50 % frente a los otros dos diseños comparados, esto se puede atribuir a que en el proceso de foto – fenton se utiliza tecnología UV.

En los procesos de reactores que tienen como insumo el ozono, se tiene un alto costo energético, también se genera subproductos en las reacciones que pueden afectar la salud humana y generar altos índices de toxicidad, los tiempos de reacción son altos provocando así elevados consumos de energía durante los procesos. El ozono es irritante y toxico en altas concentraciones. [42].

En el proceso de BRM es importante recalcar que se genera una calidad de agua tratada de muy buena calidad con una producción muy baja de lodos, razón por la cual el impacto que genera es más bajo que el de los otros dos tipos de reactores. [43].

12. CONCLUSIONES.

- Se puede concluir que el diseño más adecuado para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil es el diseño de Biorreactor de Membrana que tiene cargas ambientales en un nivel muy bajo, esto se debe a que en el proceso de este biorreactor no hubo eliminación de fangos, y en otras tesis consultadas el proceso de eliminación de fangos es en el que más carga ambiental se tiene impactando negativamente las categorías como el GWP o la toxicidad humana.
- Es importante saber que en esta investigación solo se tuvo en cuenta los impactos que tiene el reactor, al realizar un análisis de toda una planta de tratamiento, los impactos generados serán mucho mayores, ya que en toda una planta se tendrán muchos más procesos y por ende se implementan más insumos y demás que harán que el impacto ambiental sea mayor.
- Para realizar esta investigación fue de suma importancia tener bien establecidos los balances de masa con los diferentes parámetros de cada diseño de los reactores, en los casos de no tener información completa se debía complementar con otros estudios similares a los que se tenían, para así tener unos resultados mucho más reales y confiables.
- En el estudio de los tres diferentes diseños de reactores seleccionados se pudo evidenciar que el diseño de reactor de ozono – fenton es el que genera mayor impacto ambiental en casi todas las categorías de impacto evaluadas. Pero este diseño de reactor es uno de los más eficientes en el momento de realizar el tratamiento de agua residual, ya que este elimina gran porcentaje de material inorgánico en el montaje. Con esto se puede suponer que un reactor tenga un buen porcentaje de degradación genera mayor impacto ambiental.
- En el diseño de Biorreactor de membrana se evidencia que las categorías de impacto evaluadas tienen valores muy bajos, en muchos prácticamente cero. Esto se puede demostrar ya que en este diseño el único insumo que se usó fue el aire, entonces podemos decir que el impacto que generó es por el gasto energético que tuvo.

- El Análisis de Ciclo de Vida es una gran herramienta para evaluar el impacto que se genera en el ambiente, no solo en los diseños de reactores sino en muchos procesos que se hacen día a día en todo el mundo, ya que muchas veces en los diferentes procesos que se llevan a cabo no se hacen los respectivos análisis para saber que tanto se está afectando el ambiente.
- Se pudo evidenciar que para que un reactor tenga mejores condiciones de funcionamiento se deben aumentar las dosis de insumos, por ende, es mayor el impacto, ya que en la mayoría de graficas que se obtuvieron el mayor impacto se vio por parte de los insumos usados en los diferentes reactores.
- Se pudo realizar una investigación más detallada, pero la falta de información en cuanto a detalles de los diseños de reactores y de los insumos que se usan es muy limitada, por esta razón se trabajó con la información que se logró conseguir y se hizo de esta forma las comparaciones con los parámetros que se tenían.
- De los tres reactores seleccionados se pudo determinar por medio de los Análisis de Ciclo de Vida, que el diseño de reactor ozono – fenton es el que más genera impacto ambiental, esto se puede atribuir a la implementación de insumos como el ozono, ya que este es de alto gasto energético y de alto gasto ambiental según otras tesis consultadas.
- Se puede recomendar para estudios futuros tomar este trabajo de investigación como referencia, y poder buscar más diseños de reactores para así hacerles los respectivos análisis de ciclo de vida a diferentes tipos de reactores de los que se tomaron en este trabajo, y realizar una comparación más robusta, y así poder definir cuál es el diseño que más genera impacto ambiental, y cuál es el que menos impacto genera.

13. REFERENCIAS.

- [1] «Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales | IngenieriaQuimica.org».
- [2] ACNUR, «Escasez de agua en el mundo: causas y consecuencias», 2019. .
- [3] E.-A. Edson Baltazar, M.-N. Petia, M.-C. Gabriela, M.-M. Gabriela, R.-S. Norma, y S.-Z. Manuel, «Presencia y tratamiento de compuestos disruptores endócrinos en aguas residuales de la Ciudad de México empleando un biorreactor con membranas sumergidas», *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 14, n.º 2, pp. 275-284, 2013, doi: 10.1016/s1405-7743(13)72242-x.
- [4] L. A. Issn, «Diagnóstico Y Control De Material Particulado: Partículas Suspendidas Totales Y Fracción Respirable Pm10», *Luna Azul*, n.º 34, pp. 195-213, 2012, doi: 10.17151/luaz.2012.34.12.
- [5] Á. Parada Gómez, «Los efectos ambientales de la cadena global de prendas de vestir en Costa Rica», *Rev. Iberoam. Econ. Ecológica (REVIBEC)*, vol. 3, n.º 3, pp. 63-79, 2006.
- [6] T. Leal, «Tratamiento de potabilización de agua y sus limitaciones», 2016.
- [7] D. Electr, «Datos Comparativos», 2000.
- [8] L. C. Irezabal, «Membrana», *Membr. Technol.*, vol. 1998, n.º 104, p. 16, 1998, doi: 10.1016/s0958-2118(98)90568-7.
- [9] S. Monge, A. Torres, R. Ribeiro, A. Silva, y C. Bengoa, *Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales*. 2018.
- [10] S. Heredia y I. Huacho, «“Diseño, y Construcción de un Reactor Flujo en Pistón”», p. 115, 2012.
- [11] S. García-Ballesteros *et al.*, «A new methodology to assess the performance of AOPs in complex samples: Application to the degradation of phenolic compounds by O3 and O3/UV-A–Vis», *Chemosphere*, vol. 222, pp. 114-123, 2019, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.01.015.
- [12] T. Doctoral, «NILBIA RUIZ FERNÁNDEZ», 2007.
- [13] A. Bernabeu *et al.*, «Solar photocatalysis as a tertiary treatment to remove emerging pollutants from wastewater treatment plant effluents», *Catal. Today*, vol. 161, n.º 1, pp. 235-240, 2011, doi: 10.1016/j.cattod.2010.09.025.

- [14] S. Miralles-Cuevas, A. Arqués, M. I. Maldonado, J. A. Sánchez-Pérez, y S. Malato Rodríguez, «Combined nanofiltration and photo-Fenton treatment of water containing micropollutants», *Chem. Eng. J.*, vol. 224, n.º 1, pp. 89-95, 2013, doi: 10.1016/j.cej.2012.09.068.
- [15] L. F. Navarrete, L. Giraldo, y J. C. Moreno, «Influencia de la química superficial en la entapía de inmersión de carbones activados en soluciones acuosas de fenol y 4-nitro fenol», *Rev. colomb. quím.*, vol. 35, n.º 2, pp. 215-224, 2006.
- [16] I. Arévalo, «El agua», *La Granja Rev. Ciencias la Vida*, vol. 2, n.º 1, pp. 13-15, 2003, doi: 10.17163/lgr.n2.2003.06.
- [17] L. Situaci y P. Existentes, «3.2.2. Situación general y aspectos normativos».
- [18] R. Mar, «CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DE LAS AGUAS Prof. Dr. Rafael Marín Galvín».
- [19] P. V Albeitar, «Parámetros fisicoquímicos del agua», pp. 1-4, 2013.
- [20] Jiménez, «ST $\Delta \approx 550 \pm 50^\circ\text{C}$ Filtrar ensayo Imhoff STf Filtrado $\Delta \approx 105^\circ\text{C}$ Residuo $\Delta \approx 105^\circ\text{C}$ Sedimento Ss $\Delta \approx 550 \pm 50^\circ\text{C}$ SDf», vol. 2, n.º 23, 2015.
- [21] A. N. A. M. Hernández y G. A. Coy, «Revisado por: ana maria hernández», pp. 1-9, 2004.
- [22] M. E. D. S, «Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales», 2007.
- [23] G. A. Coy, «Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales», 2007.
- [24] A. L. Ivester y L. J. Warshaw, «TEXTILES», 2010.
- [25] C. Textil, P. Angulo, y M. Angel, «2 INDUSTRIA TEXTIL INDUSTRIA TEXTIL EN EL MUNDO países , en particular para países en desarrollo . Esta industria en el año 2001 representó», 2001.
- [26] U. Autonoma, «Contaminación generada por colorantes de la industria textil».
- [27] M. Brañez Sánchez, «Contaminación de los ambientes acuáticos generados por la industria textil», *Campus*, vol. 23, n.º 26, pp. 129-143, 2018, doi: 10.24265/campus.2018.v23n26.03.
- [28] «Las aguas residuales y sus efectos contaminantes | iAgua».
- [29] R. S. Ramalho, «Pretratamientos y Tratamientos Primarios», *Chan, B. K. C.*, vol. 6, n.º 6, p. 89, 2000.
- [30] Belzona Inc., «Guía de Aplicaciones Belzona en Equipos de Tratamiento de Aguas Residuales-Tratamiento de Aguas Residuales», *Belzona*, 2010.
- [31] F. Cunill, M. Iborra, y J. Tejero, «Reactores químicos-apuntes», *React. químicos-apuntes*, pp. 70-89, 2010.
- [32] A. Deiana, D. Granados, y F. Sardella, «Balance De Masa», *Introd. a La Ing.*, pp. 1-26, 2018, Accedido: 05-nov-2020. [En línea]. Disponible en: <http://www.fi.unsj.edu.ar/ asignaturas/introing/BalanceDeMasa.pdf>.
- [33] J. Carlos y D. Holguín, «SIMULACIÓN DEL CICLO DE VIDA», *Capítulo 3. Metodol. Del Análisis Del Ciclo Vida*, n.º 477, pp. 1-14, 2006, Accedido: 05-nov-2020. [En línea]. Disponible en: https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250504/2013/ Analisis del Ciclo

- de Vida.pdf.
- [34] «Capítulo 3 metodología del análisis del ciclo de vida».
- [35] European Commission, «Etapas de un ACV», pp. 2-5, 2004, Accedido: 11-nov-2020. [En línea]. Disponible en: http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=ECOIL_Ciclo_de_Vida.pdf.
- [36] L. Salazar, C. Rosell, y R. Salazar, «Tratamiento de aguas residuales textiles mediante membranas», *Ing. y Desarro.*, p. 26, 2009.
- [37] R. Goyena, «Evaluación del proceso ozono-fenton para el tratamiento de aguas residuales de una industria textil», *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, n.º 9, pp. 1689-1699, 2016.
- [38] José Blanco Jurado, «Libro Fenton Ok», p. 152, 2009.
- [39] R. L. García, «BALANCES DE MASA Y ENERGÍA».
- [40] «Análisis del Ciclo de Vida».
- [41] W. MArimon, «Ingeniería de Nanopartículas Magnéticas para la Remoción de Metales Pesados en Aguas», *Separation and Purification Technology*, vol. 1, n.º 2. pp. 54-67, 2018, Accedido: 11-nov-2020. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>.
- [42] A. Pérez *et al.*, «No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における健康関連指標に関する共分散構造分析Title», *BMC Public Health*, vol. 5, n.º 1, pp. 1-8, 2017, Accedido: 16-nov-2020. [En línea]. Disponible en: http://www.cytod.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidaciones_avanzadas_0.pdf.
- [43] E. R. Energéticos *et al.*, «UNIVERSIDAD DE CANTABRIA Escuela Politécnica de Minas y Energías EVALUACIÓN AMBIENTAL Y ENERGÉTICA DEL TRATAMIENTO ENERGETIC AND ENVIRONMENTAL EVALUATION OF GREY WATER TREATMENT UNDER A LIVE CICLE ASSESMENT APROACH», 2016.