



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



SECRETARIA DE EDUCACION PUBLICA
TECNOLOGICO NACIONAL DE MEXICO
INSITUTO TECONOLÓGICO DE VERACRUZ

**“EVALUACIÓN DEL PROCESO DE OZONIFICACIÓN AVANZADA
(POA) COMO TRATAMIENTO DE REMOCIÓN DE
CONTAMINANTE NÍQUEL EN AGUAS RESIDUALES
INDUSTRIALES”**

PROYECTO DE TITULACIÓN INTEGRAL (TESIS)

PRESENTA:

GILBERTO GARCÍA SÁNCHEZ

ASESOR INTERNO:

DR. MARIO DÍAZ GONZALEZ

ASESOR EXTERNO:

DRA. OLAYA PIRENE CASTELLANOS ONORIO

H. VERACRUZ, VER., MARZO 2024

AGRADECIMIENTOS

Los más sinceros agradecimientos a la Dra. Olaya Pirene Castellanos Onorio y al Dr. Mario Díaz González por la dirección y apoyo de este trabajo; además, de agradecer su presencia, tiempo y dedicación que tuvo para que esto saliera de manera exitosa. Su mentoría fue esencial para el desarrollo del proyecto y conocimiento adquirido durante el tiempo dedicado.

Menciones especiales al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del proyecto 18441.23-P.

Y, por supuesto, el agradecimiento profundo va para la familia. Sin su apoyo inquebrantable y paciencia infinita, no habría sido posible llevar a cabo esta investigación. Su amor y aliento fueron el motor que impulsó este logro.

I. RESUMEN

La contaminación del agua es una de las problemáticas fundamentales en los últimos años, al igual que la industria de metales pesados es una de las principales que emite sus residuos a la fuente más importante para el hombre, la hidrosfera, es por ello que se ha tomado la alternativa para remediar esta problemática con el uso de la implementación de nuevos tratamientos para remoción de contaminantes como lo es el Níquel, por ello se busca comparar los diferentes métodos previamente analizados como son el reactivo Fenton el cual es un oxi-coagulante expuesto a diferentes concentraciones (150, 300 y 450 ppm), a condiciones de pH ligeramente alcalinos (pH de 8 y 10) en tiempos de reacciones de 30' y 60' minutos, para esta comparativa por el método de ozonificación este siendo uno de los tratamientos más utilizados en la industria para la eliminación de malos olores, remoción de metales pesados por ello se realizó el tratamiento con un ozonificador las mismas muestras previamente mencionadas y se realizó con solución de Níquel a 60 ppm, este dejando que actuara en tiempos (30 y 60 minutos) esto como alternativa de tratamiento de aguas residuales, el estudio se realizó a nivel laboratorio en el Instituto Tecnológico de Veracruz.

Palabras clave: ozonificación, remoción, oxi-cuagulante.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	2
I. RESUMEN.....	3
ÍNDICE.....	4
LISTA DE TABLAS	6
LISTA DE FIGURAS.....	6
LISTA DE GRAFICAS	6
III. JUSTIFICACIÓN.....	8
IV. MARCO TEÓRICO	9
4.1. AGUA.....	9
4.2. CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO.	9
4.2.1. AGUAS RESIDUALES	9
4.2.2. AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES.....	10
4.2.3. AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES.....	11
4.3. NÍQUEL	13
4.4. CALIDAD DEL AGUA	15
4.5. CARBONO ORGÁNICO TOTAL (COT)	16
4.6. PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA (POA)	16
4.7. PROCESOS QUÍMICOS UTILIZADOS EN AGUAS RESIDUALES	20
4.7.1. FENTON.....	20
4.7.2. FOTO-FENTON.....	20
4.7.3. ELECTRO FENTON.....	21
4.7.4. OXIDACIÓN ELECTROQUÍMICA	21
4.7.5. DARK FENTON	22
4.7.6. OZONIFICACIÓN.....	22
V. PROCEDIMIENTO	24
5.1. MATERIALES	24
5.1.1. REACTIVOS.....	24
5.1.2. MATERIAL	24
5.1.3. EQUIPO.....	24
5.2. PROCEDIMIENTO.....	25

5.2.1. PROCEDIMIENTO GENERAL	25
5.2.2. TRATAMIENTO OZONIFICACIÓN	26
5.2.3. TRATAMIENTO DE ULTRASONIDO	26
5.2.4. TRATAMIENTO FENTON.....	27
5.2.5. FENTON.....	27
VI. RESULTADOS	28
I. ESTANDARIZACIÓN MÉTODO (CUANTIFICACIÓN DE NI)	28
II. COMPARAR CONDICIONES DE PH ÁCIDOS Y BÁSICOS EFECTIVOS EN LA REMOCIÓN DE NÍQUEL USANDO POA'S.	30
III. EVALUAR LA CONCENTRACIÓN-DOSIS EFECTIVA DE TRATAMIENTOS CONVENCIONALES DE FLOCULACIÓN Y POAS COMO PARÁMETRO DE RESPUESTA DE REMOCIÓN DE NÍQUEL.	33
IV. EVALUAR LOS TRENES DE TRATAMIENTOS DE LOS POAS EFECTIVOS QUE PERMITAN EL RE-USO DE EFLUENTE EN OTROS PROCESOS UNITARIOS CONVENCIONALES.....	34
V. COMPARACIÓN DE ELECTROCOAGULACIÓN CON LA APLICACIÓN DE DIFERENTES ELECTRODOS PARA REMOCIÓN DE NÍQUEL.....	35
VI. CONCLUSIONES.....	36
VII. ANEXOS	37
RESULTADOS DE REMOCIÓN	37
VIII. FUENTES DE INFORMACIÓN	46

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Características de aguas residuales</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 2. Límites máximos permisibles para metales pesados</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 3. Calidad del agua</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 4. Principales procesos de oxidación avanzada</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 5. Poderes de oxidación de agentes oxidantes</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 6. Resultados de absorción y medición de remoción a 150 ppm.</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 7. Resultados de absorción y medición de remoción a 300 ppm</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 8. Resultados de absorción y medición de remoción a 450 ppm.</i>	<i>39</i>

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Croquis del Instituto Tecnológico de Veracruz.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2. Clasificación de las tecnologías de oxidación avanzada</i>	<i>18</i>

LISTA DE GRAFICAS

<i>Gráfico 1. Curva de calibración pH 8.....</i>	<i>28</i>
<i>Gráfico 2. Curva de calibración pH 10.....</i>	<i>28</i>
<i>Gráfico 3. Grafica de remoción a 150 ppm.....</i>	<i>37</i>
<i>Gráfico 4. Grafica de remoción a 300 ppm.....</i>	<i>38</i>
<i>Gráfico 5. Grafica de remoción a 450 ppm.....</i>	<i>39</i>

II. INTRODUCCIÓN

En nuestro país está ubicado en el número 14 en productores de acero en todo el mundo, esto nos habla de una producción nacional entre los 20 millones de toneladas de acero, el principal material utilizado para esta fabricación es el níquel, este es un metal pesado que suele combinarse con hierro, cobre o cromo para la elaboración de diversos productos que a lo largo de los años la concentración de este material está presente en cantidades bajas en ríos y lagos este en una cantidad menos de 10 partes por billón de níquel siendo esto consecuencia del mal manejo de empresas de sus residuos.

En México los recursos hidráulicos se encuentran en crecimiento esto ya que los usuarios comprendidos en el sector industrial logran satisfacer las exigencias sin tomar en cuenta los impactos que generan en la hidrosfera, esto aunado a la urbanización, la demanda de agua limpia y la expansión demográfica conlleva al uso global del agua. La falta de interés en las autoridades y en la búsqueda de tratamientos cada vez más eficaces y el reusó de aguas residuales generadas lleva a una sobre explotación del recuso (De la Peña, 2013).

En los últimos años, diferentes organismos como el Banco Mundial y la Organización Mundial de la Salud (OMS), se han encontrado en la resolución de este problema donde se lleve a cabo la eliminación de diferentes aspectos para problemática que, en nuestro país, el agua residual sin tratar en ocasiones es ocupara en los riegos de cultivo, esto provoca riesgos a la salud relacionada a esta actividad, si bien los tratamientos de agua.

El presente trabajo fue financiado por el Tecnológico Nacional de México con el código 18441.23-P.

III. JUSTIFICACIÓN

La gestión de sitios contaminados persigue el objetivo primordial de salvaguardar la salud humana y la integridad del entorno. La prioridad recae en la remediación de aquellos lugares que presenten riesgos significativos para la salud de las personas o el bienestar ambiental. El enfoque adoptado para la remediación y las tecnologías de tratamiento empleadas se moldean en función de la evaluación precisa de los riesgos identificados para la salud y el medio ambiente, así como de las futuras aplicaciones previstas para las áreas en proceso de recuperación.

Resulta esencial destacar que la noción de "tecnología de tratamiento" engloba una gama diversa de procesos unitarios o sucesivos que alteran la composición de sustancias peligrosas o contaminantes, participando en la preservación de la calidad del agua y el equilibrio de los ecosistemas acuáticos. (EPA, 2001).

La resolución de la problemática detrás de este enfoque radica en la responsabilidad de preservar la salud pública y el medio ambiente para las generaciones presentes y futuras. Al abordar los riesgos y aplicar tecnologías adecuadas, se avanza hacia la recuperación de áreas previamente degradadas, permitiendo su reintegración segura en la sociedad y garantizando la sostenibilidad a largo plazo.

IV. MARCO TEÓRICO

4.1. AGUA

Dicho elemento es considerado el recurso natural más importantes en todo el mundo, ya que es indispensable tanto para la vida de los ecosistemas, servicios e industrias, este recurso abarca el 71% del suelo terrestre. Alrededor del 97% del agua del planeta se encuentra en los océanos y el restante se halla en los continentes en forma de agua dulce, a pesar de esto se tiene una mala conciencia del uso de esta (Comisión Nacional del Agua, 2019).

4.2. CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO.

4.2.1. AGUAS RESIDUALES

La producción de aguas residuales (AR) es inevitable, esto debido a las actividades antropogénicas, su tratamiento y disposición correcto de este tipo de aguas supone el conocimiento de sus características, biológicas, físicas y químicas, además de conocer su origen y sus efectos sobre la fuente de origen. Las aguas residuales son de composición variada proveniente de descargas que bien pueden ser de índole municipal, industrial, comercial, agrícola, pecuario, doméstico o de cualquier otro proceso por el cual se haya degradado su calidad (cambio de características biológicas, físicas y químicas).

Podemos clasificar el agua residual de dos maneras: aguas industriales y municipales. El vertido de aguas residuales de hogares, industrias, del servicio agrícola y ganaderas sin tratar conduce a la contaminación de la fuente de agua receptora, reduce la calidad de las aguas que se encuentran en el subsuelo y la superficie, esto tiene un peligro la salud de las personas y la existencia de los nuestros ecosistemas como hoy los conocemos (Jiménez, Cisneros et al., 2010).

Las aguas residuales municipales descargadas de casas, edificios públicos y escurrientías urbanas se recolectan en el sistema de alcantarillado. En ellas sus principales contaminantes encontrados: nitrógeno y fósforo, los cuales son compuestos orgánicos, bacterias coliformes fecales, la presencia de materia orgánica, entre otros. En el 2014, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales informó los centros urbanos registraron de 229.73 m³/s de aguas residuales.

4.2.2. AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

El porcentaje actual de aguas residuales municipales que es tratada en los países subdesarrollados ronda en un 10%, mientras que en Latino América según Silva en 2006 es un aproximado al 14% esto debido a los altos costos de tratamiento de aguas reportados en el 2001 por Kivaisi.

En el país se tratan 83.6 m³ s⁻¹ de los 235.8 m³ s⁻¹ que se generan; es decir, sólo 35.5%. En el 2010 La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) comunicó que México, junto con Brasil, Colombia, Nicaragua, Perú y Uruguay, se encuentra entre las naciones latinoamericanas que han ampliado su alcance en el tratamiento de aguas residuales domésticas en los últimos años.

En México los tratamientos de aguas residuales se han transformado en una prioridad dentro de las agendas políticas se muestran la evolución del caudal tratado anualmente hasta el año 2012. con la información de los Organismos de Cuenca y las Direcciones Locales de la Conagua, estas aguas usualmente son pretratadas como el sector de tratamiento primario o el reactor biológicos, se usa la sedimentación para poder remover los sólidos que se encuentran presentes en estas aguas donde se suele usar tecnologías contaminantes, en situaciones donde estas aguas tratadas son reincorporadas en cuerpos de agua.

Las descargas de agua municipal tienen una cuarta parte de carga contaminada, los factores de sumo impacto y que en diversas situaciones no lo consideran son los depósitos de basura y el escurrimiento de este es contaminante por ello tienen una calidad de agua muy baja, estas son una combinación de aguas urbanas e industriales, cabe destacar que el agua tratada es principalmente usada para actividades humanas, por esta razón el correcto tratamiento de estas es importante para evitar enfermedades en la población así mismo como la contaminación.

4.2.3. AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

Zodi en el 2010 menciona que el agua descargada por industrias sigue siendo a nivel mundial un problema importante de contaminación ambiental, esto se debe a su enorme cantidad y diversidad tan sólo en México el sector de industrias generó en 2012 un caudal medio de 210 m³ s⁻¹. Existe un total de 2 569 plantas con capacidad instalada de 89 m³ s⁻¹, de las cuales operan 2 530 y tratan 60.5 m³ s⁻¹ de efluentes industriales y cuentan con una capacidad instalada de 74.9 m³ s⁻¹. Como alternativa se busca impulsar acciones para incrementar y mejorar el tratamiento de las aguas industriales con las siguientes acciones:

1. La mejora el funcionamiento del tratamiento de estas aguas.
2. Nuevo diseño de la infraestructura de aguas residuales.
3. Aumentar el uso y manejo de fuentes de energía alternativa para generar un autoconsumo de los tratamientos utilizados en este proceso.

Tabla 1. Características de aguas residuales

Parámetros	Tamaño de población (No. De habitantes)			
	2500 a 10 000	10 000 a 20 000	20 000 a 50 000	50 000 a 100 000
pH	7.4	6.9	6.9	7.3
Temperatura (°C)	25	20	23	22
Sólidos sedimentables ml/l	9	5	8	3
Grasa y aceites	56	44	65	96
N. amoniacal	27	28	14	12
N. orgánico	18	23	23	9
N. Total	37	44	30	24
Fosfatos totales (detergentes)	20	24	16	29
Coliformes totales (NMP x 10 ³)	14	11	17	17
Sólidos	7	773	14	197
Totales	1,552	1,141	1,391	932
Totales suspendidos	286	309	233	167
Totales disueltos	1,266	832	1,158	765
Totales volátiles	737	571	449	349
Volátiles suspendidos	223	192	151	139
Totales disueltos	514	379	290	210
Totales fijos	815	570	942	583
Fijos suspendidos	116	145	183	58
Fijos disueltos	699	425	759	525

Nota: las concentraciones son expresadas en mg/L.

Tabla 2. Límites máximos permisibles para metales pesados

Parámetro (mg/L)	Ríos uso en riego agrícola		Ríos uso público urbano		Aguas Naturales (EPA 1986)	Riego agrícola (SEDUE 989)
	Promedio mensual	Promedio diario	Promedio mensual	Promedio diario		
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.05	0.1
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.01	0.01
Cobre	4	6	4	6	1.5	0.2
Cromo	1	1.5	0.5	1	0.1	1
Mercurio	0.01	0.02	0.01	0.01	0.002	-
Níquel	2	4	2	4	0.632	0.2
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.0015	5
Zinc	10	20	10	20	5	2

Valores idénticos para protección de vida acuática establecidos por la secretaria de Gobierno en la NOM-001-SEMARNAT-2021, donde nos indica los anteriores valores establecidos para los metales pesados anteriormente mencionados. 10.2.4. Metales pesados

Los metales pesados están en la superficie de nuestro planeta como trazas, estos son consumidos por el suelo, partículas suspendidas y sedimentadas, o disueltos como son las sales en sistemas acuosos naturales. Algunos metales contaminantes que se encuentran en mayor presencia mercurio, plomo, cromo, níquel, en México hay ciudades donde se encuentran más afectados Zacatecas, Querétaro y San Luis Potosí. En nuestro país existen especies con la capacidad de poder retener metales, esto se ha tomado como una ventaja dentro del proceso de limpieza de aguas este tiene un resultado positivo, cabe mencionar que los metales pesados proceden de la corteza terrestre, estos pueden terminar tanto en aguas de ríos, mares y lagos, como pueden terminar en alimentos, en estos casos es necesario llevar un control y monitoreo de su presencia en diversos canales de riego junto con nuevas tecnologías.

Lucho en 2005 definió los metales pesados hace referencia a un elemento químico metálico que tiene como propiedades: en concentraciones bajas son peligrosos y venenosos alta densidad. Algunos ejemplos de metales pesados o también conocidos como metaloides, son el níquel (Ni), cadmio (Cd), arsénico (As), cromo (Cr), mercurio (Hg), talio (Tl), y plomo (Pb), entre otros.

Rittmann y McCarty en 2001, nos indican que el impacto negativo generado debido a la toxicidad de estos elementos, en las fuentes de agua receptoras es muy alto, ya que la mayoría de éstos tienden a permanecer indefinidamente en el medio ambiente.

Este problema ambiental se agrava, ya que la materia orgánica presente en el río, natural y antropogénica (agregada por el hombre mediante la disposición inadecuada de sus aguas residuales domésticas, industriales y residuos sólidos urbanos), es la mejor forma de transportar los metales pesados aguas abajo, degradando los ecosistemas por donde circulan (Glynn, H. y Gary, H., 1999)

De acuerdo Escobar, Soto-Salazar, y Toral en el año 2006 afirman que La aparición de problemas en la calidad del agua ha impulsado la creación de enfoques novedosos destinados a abordar estos desafíos.

4.3. NÍQUEL

El níquel, un metal puro de tonalidad blanca y plateada, es altamente apreciado por su capacidad de unirse con otros metales y conformar aleaciones. Se combina con metales tales como hierro, cobre, cromo y zinc, generando aleaciones con propiedades valiosas, como resistencia a la corrosión y dureza. En aplicaciones industriales, se utiliza en la manufactura de componentes como válvulas y sistemas de intercambio de calor.

Además de su función en las aleaciones, el níquel desempeña un rol fundamental en la creación de monedas de menor denominación y joyería, ya que contribuye a la durabilidad de los metales preciosos. También se emplea en la industria química, donde se fusiona con elementos como cloro, azufre y oxígeno para originar compuestos de níquel, algunos de los cuales son solubles en agua y poseen un distintivo color verde.

Estos compuestos son útiles en procesos de niquelado, tintado de cerámica y producción de baterías. Además, ciertos compuestos de níquel funcionan como catalizadores, acelerando reacciones químicas sin ser consumidos en el proceso.

El níquel también exhibe propiedades físicas destacadas, al ser un eficiente conductor de electricidad y calor, lo que lo hace preciado en aplicaciones relacionadas con la electricidad

y el calentamiento. Sin embargo, es esencial tener en cuenta que algunas personas pueden ser sensibles o alérgicas al níquel, por lo que se requiere precaución al usar objetos que contengan este metal, como joyas, especialmente si entran en contacto con la piel.

En Resúmenes de salud pública en 2016, se encuentran de forma natural en la cubierta terrestre con otros elementos presentes, estos son liberados por volcanes y de igual manera se encuentra de forma natural en los suelos.

Un elemento presente y que es abundante siendo el número 24 en una lista de elementos tóxicos es el níquel (Ni), sin embargo, en el ambiente están dos elementos, azufre u oxígeno en forma de sulfatos u óxidos. El níquel se encuentra de forma natural en el fondo de los océanos y meteoritos, forman nódulos del fondo del mar esto por su masa mineral, en el centro de la tierra se encuentra alrededor de 6% de níquel, este es liberado a la atmosfera esto por industrias que desechan este material en aguas residuales, por medio de plantas de energía que son quemadas por petróleo o carbón producto de la basura que es incinerada.

Algunas aplicaciones del alambre de acero inoxidable y aleaciones de níquel presentes en la industria alimenticia, arquitectónicas, automotriz y en algunos sectores de construcción, usado por utensilios de cocina y en la industria química es principalmente utilizado el níquel en la fabricación de tubos, esto aunado con residuos de otros metales, la industria petroquímica y lagunas otras aplicaciones marinas.

El níquel es liberado por el aire, este mediante las plantas de energía y la quema de basura, una de las causas de contaminación en la atmosfera, por ello esto se busca una alternativa ya que son depositados en el suelo y después terminan reaccionando con las gotas de lluvia, generalmente el níquel termina en la superficie donde está el agua.

4.4. CALIDAD DEL AGUA

La calidad del agua es utilizada como herramienta para poder medir la condición del recurso hídrico por ello en México se han creado normativas para la regularización de descargas de aguas residuales y con ello poder conocer la calidad de agua tratada, dentro de las cuales destacan:

- Norma Oficial Mexicana NOM-001-Semarnat-1996, indica los límites máximos permitidos de contaminantes en la descarga de aguas residuales.
- Norma Oficial Mexicana NOM-002-Semarnat-1996, esta norma establece los límites de contaminantes permitidos de agua residual en los alcantarillados municipal o urbanos.
- Norma Oficial Mexicana NOM-003-Semarnat-1997, esta norma establece el límite de contaminantes máximos para aguas residuales, estas tratadas y que se reúsen en servicios de agua públicos.
- Norma Oficial Mexicana NOM-004-Semarnat-2001, esta norma indica las especificaciones y límites establecidos de contaminantes presentes en lodos y biosólidos para que puedan ser usados para una disposición final y tener un buen aprovechamiento de estas.

En cada nuevo sexenio en nuestro país se lleva a cabo el Programa Nacional Hídrico junto con el Plan Nacional de Desarrollo, esto aunado con otros planes los cuales buscan la preservación, así como el aprovechamiento del agua, buscan aumentar la extensión de cobertura con el objetivo de restablecer la calidad del agua en ríos y acuíferos nacionales. A partir de esto se comenzó a desarrollar instrumentos legales, económicos y tecnológicos que puedan estimular el reusó de estas aguas para actividades en las cuales no requieran agua que provienen de fuentes naturales.

Muñoz y Álvarez en el 2016 en su libro Bases de la Ingeniería Ambiental realizaron un índice de la calidad del agua (ICG) se mide de 0 siendo está el agua contaminada a 100 donde se describe como agua prácticamente limpia, esto medido con variables y parámetros como pH, conductividad entre otros, dando valores adimensionales por ello ponderaron para que sea posible medir la calidad con un parámetro igual o menor a 100.

Tabla 3. Calidad del agua

Calidad del agua	ICG agua
Muy buena	Entre 85 y 100
Buena	Entre 75 y 85
Utilizable	Entre 65 y 75
Mala	Entre 50 y 65
Pésima	Menor a 50

Muñoz Andrés, V., Rodríguez Álvarez, Jesús. (2019) presentan la anterior tabla con la que se puede medir la calidad del agua.

4.5. CARBONO ORGÁNICO TOTAL (COT)

La cantidad de oxígeno total es la cantidad de compuestos orgánicos no volátiles, las aguas residuales están compuestas principalmente de compuestos orgánicos los cuales tienen diferentes estados de oxidación.

4.6. PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA (POA)

Ikehata en el 2008 describe que la contaminación antropogénica en aguas que son tratadas con métodos o procesos biológicos como: biológicos, floculación-precipitación, adsorción y cloración, en ocasiones se utilizan métodos de limpieza de agua como carbón activado, zeolita o arena silica por mencionar los más utilizados en estos procesos, entre otras tecnologías. Sin embargo, en diversas situaciones estas tecnologías disponibles no logran alcanzar el límite mínimo para considerar una buena calidad de agua, esto debido a las diferentes cantidades de contaminantes que contienen compuestos dañinos en las aguas de consumo, las aguas superficiales o en los efluentes de algunas purificadoras de agua en el país.

Gogate y Pandit en 2004, ha descrito que en las últimas décadas las tecnologías utilizadas en el proceso de oxidación avanzada se han convertido en una nueva alternativa eficiente en la destrucción de materias tóxicas, sustancias orgánicas e inorgánicas, patógenos u metales,

durante el tratamiento de aguas contaminadas se usan tecnologías de oxidación avanzada cuando los efluentes contaminados son aquellos que tienen una baja biodegradabilidad. El uso de esta tecnología es común en los tratamientos terciarios empleados en plantas de purificación en industrias, una de las alternativas encontradas en la aplicación son la remediación de suelos contaminados, agua superficial y gaseosa.

Durante la actualidad se han desarrollado propiedades, parámetros y valores óptimos para poder identificar si el tratamiento empleado es aceptado de acuerdo a lo establecido en normas mexicanas para que el agua pueda ser utilizada para otros fines, algunos de estos son: pH, temperatura, concentración de contaminantes y de agente oxidante utilizado, todo esto monitoreando para mejorar la reacción durante el proceso.

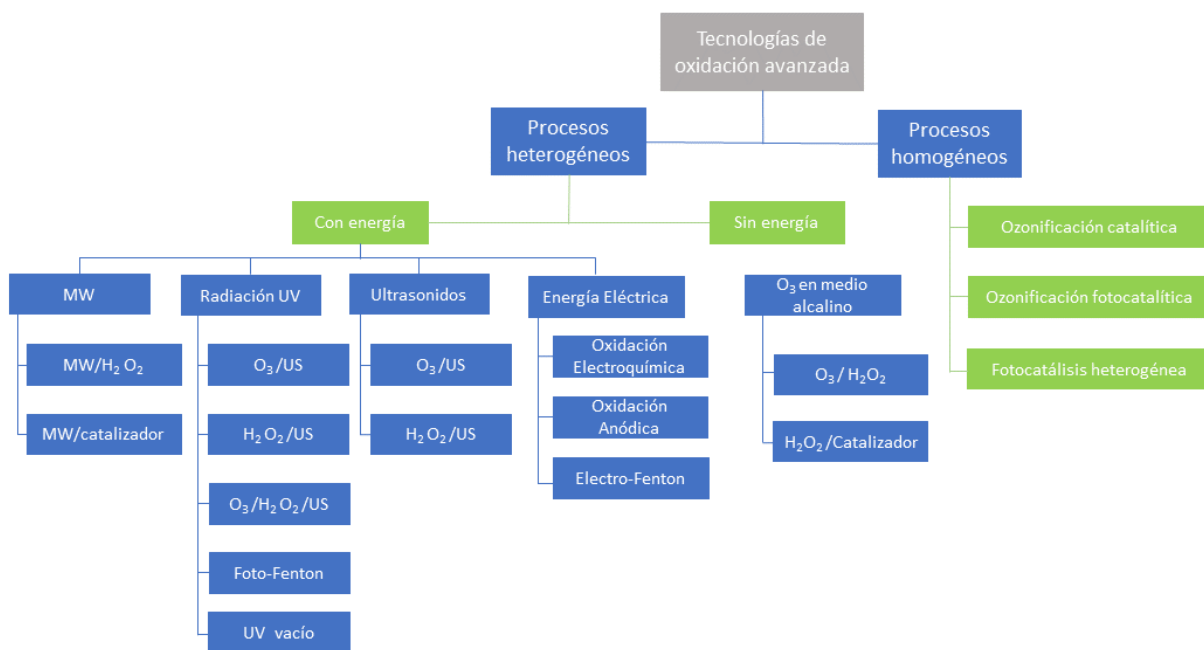
En el proceso de tratamiento, se recomienda examinar minuciosamente la cinética de reacción, que suele ser mayormente de primer orden. Esto se debe a que tiende a haber oxidación en la concentración de radicales hidroxilos y otras especies.

Tabla 4. Principales procesos de oxidación avanzada

Tecnología de Oxidación avanzada	Proceso utilizado
Ozonificación/ Peróxido de hidrogeno	Oxidación del agua, fotolisis ultravioleta-vacío
Proceso Fenton	Ultravioleta/peróxido de hidrogeno
Oxidación electroquímica	Ultravioleta/ozono

Forero et al., 2005

Figura 1. Clasificación de las tecnologías de oxidación avanzada



Fuente Sanz et al., 2013.

En los estudios de los procesos actuales se enfocan en parámetros que suelen afectar en el proceso de oxidación entre estos se encuentra el pH, temperatura, concentración y los agentes oxidantes. El rango habitual para la velocidad de reacción se encuentra entre los 10⁸-10¹¹ L mol L⁻¹ s L⁻¹, así también como su concentración de los radicales °OH tienen un rango de 10-12 mgL⁻¹ (Arstan-Alaton,2003).

Algunas de las ventajas de los procesos de oxidación avanzada se pueden mencionar que eliminan contaminantes que contienen degradación biológica, oxidantes residuales y aquellos que puedan tener alguna afectación a la salud humana, sustancias orgánicas, inorgánicas, sustancias tóxicas, sin embargo, estos procesos son de costos altos en comparación a otros procesos de remoción.

Tabla 5. Poderes de oxidación de agentes oxidantes

Especies	Potencial de Oxidación (voltios)
Flúor	3.06
Radicales Hidroxilos ($\text{OH}^{\cdot}$)	2.8
Oxígeno Atómico	2.42
Ozono	2.07
Peróxido de Hidrógeno	1.78
Hipobromito	1.48
Cloro Libre	1.36
Hipobromito	1.33
Dióxido de Cloro	0.95

Fuente Fernández, C. D. (2016).

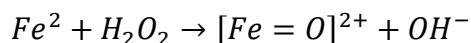
La oxidación avanzada desempeña un papel esencial en la gestión ambiental y la purificación del agua. Este proceso se basa en reacciones químicas altamente eficientes que permiten la degradación de compuestos orgánicos persistentes y contaminantes emergentes, los cuales suelen ser difíciles de eliminar mediante métodos convencionales. Su capacidad para eliminar contaminantes peligrosos, como pesticidas, herbicidas, compuestos farmacéuticos y productos químicos industriales, resulta crucial para proteger la salud pública y preservar el medio ambiente. Además, la oxidación avanzada puede ser aplicada en sistemas de tratamiento de aguas residuales y potables, así como en la desinfección de aguas contaminadas, ofreciendo una solución efectiva y sostenible para enfrentar los desafíos asociados con la calidad del agua en diversas aplicaciones.

4.7. PROCESOS QUÍMICOS UTILIZADOS EN AGUAS RESIDUALES

4.7.1. FENTON

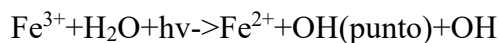
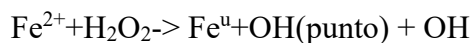
El reactivo Fenton es una solución de peróxido de hidrogeno reducido con el hierro; con él se genera un radical libre hidroxilo, la reacción Fenton involucra dos principales componentes: catalizador el cual puede ser una sal, entre ellas Fe(II) o Fe(III), donde se sugiere utilizar sulfato de hierro para la elaboración de este reactivo, y un oxidante, comúnmente utilizado el peróxido de hidrogeno (Brillas,2006).

La reacción siguiente al ser realizada, ocurre una disminución de pH, lo cual el hierro es agregado para posteriormente sucede un decrecimiento más profundo, donde el peróxido de hidrogeno se agrega y ocurre una fragmentación del material orgánico ocupado en el proceso en ácidos orgánicos, por lo que al ocurrir un cambio de pH indicaría que el proceso se esta realizando de manera correcta.



4.7.2. FOTO-FENTON

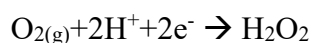
Este enfoque tecnológico consiste en un método para tratar aguas residuales que combina peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso bajo condiciones de presión atmosférica. La presencia de ferro-hidroxisolubles y el complejo orgánico, como los ácidos de hierro, permite la absorción de radiación ultravioleta y parte del espectro visible (Malato, 2009). Este método se emplea específicamente cuando se busca lograr una reducción significativa de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Durante el proceso, el reactivo de Fe (II) experimenta una oxidación a Fe (III), descomponiendo el peróxido de hidrógeno y generando radicales hidroxilos según la Ec. 1. La introducción de radiación UV-Vis aumenta la capacidad de oxidación, principalmente mediante la foto-reducción de Fe (III) a Fe (II), lo que amplifica la producción de radicales hidroxilos según la Ec. 2. Este ciclo en el reactivo de Fenton facilita la generación continua de radicales hidroxilos para la oxidación de compuestos, como se describe en la Ec. 3.



4.7.3. ELECTRO FENTON

Se trata de un procedimiento electroquímico de oxidación avanzada que se fundamenta en la generación in situ de radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$) mediante un proceso electrocatalítico. Implica la creación catódica inicial de H_2O_2 y/o la producción anódica de sacrificar $\text{Fe}(\text{II})$, además de que el $\text{Fe}(\text{II})$ puede ser regenerado a partir de la reducción de $\text{Fe}(\text{III})$ en el cátodo empleado con la función catalítica del hierro a lo largo del proceso. En este caso, el radical OH puede ser generado mediante la oxidación del agua en el ánodo.

Producción de peróxido de hidrogeno por medio de oxígeno disuelto en la superficie del catodo



Producción de radicales hidroxilos entre el peróxido de hidrogeno y el ion ferroso.



Degradación de los compuestos orgánicos por acción de los radicales hidroxilos.



4.7.4. OXIDACIÓN ELECTROQUÍMICA

La electrodialisis como POA electroquímico combina las membranas y el campo eléctrico es la electrodialisis la cual consiste en remover componentes iónicos de soluciones acuosas empleando membranas permeables selectivas en un campo eléctrico constante (Guastali et al, 2004). Esta técnica tiene la capacidad de remover iones contaminantes cargados de hasta 0.0001 um, mediante hojas o laminas porosas de resinas de intercambio iónico con una baja permeabilidad relativa para el (Taylor Wiesner, 2002).

En cambio, la electrocoagulación, es un proceso que aplica los principios de la coagulación-floculación en un reactor electrolítico. Este es un recipiente dotado de una fuente de corriente

y varios electrodos encargados de aportar los iones desestabilizadores de partículas coloidales que reemplazan las funciones de los compuestos químicos que se utilizan en el tratamiento convencional, induciendo la corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas (Morante, 2002; Caviedes-Rubio, D. I., 2015).

4.7.5. DARK FENTON

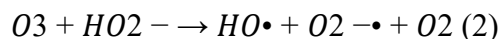
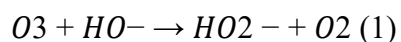
Los compuestos orgánicos no fotoquímicos (POA) generan especies altamente reactivas, con el radical hidroxilo como la especie predominante. Esto se logra a través de la transformación de diversas especies químicas o mediante la aplicación de diversas formas de energía, excluyendo específicamente la irradiación luminosa. La formación de estas especies reactivas, particularmente el radical hidroxilo, resulta de procesos químicos o la introducción de energía en formas distintas a la luz, destacando así la versatilidad de los mecanismos de generación de estas especies altamente reactivas. Este fenómeno subraya la importancia de comprender y controlar la formación de radicales hidroxilos en contextos donde la irradiación luminosa no es un factor contribuyente. Además, resalta la diversidad de rutas y procesos que pueden desencadenar la producción de especies reactivas, lo cual es crucial para diseñar estrategias efectivas en el manejo de compuestos orgánicos y la gestión medioambiental.

4.7.6. OZONIFICACIÓN

El ozono es un gas inestable e incoloro, un oxidante potente este se genera poco tiempo después en el agua y se forma con el oxidantes, entre ellos el principal es el radical libre OH, donde esta busca la presencia de partículas como microorganismos o moléculas orgánicas para que puedan reaccionar químicamente con los radicales OH. Aunque la ozonificación es una tecnología altamente eficiente y deseada en la industria para el tratamiento, su aplicación es limitada debido a los elevados costos asociados con los sistemas de generación de ozono. Por lo tanto, resulta imprescindible explorar opciones de diseño más económicas que mantengan un nivel de eficiencia equivalente para satisfacer las demandas de la industria.

Las variables que determinan la efectividad de este tratamiento utilizado para eliminar impurezas en el agua, son el tiempo de contacto con la muestra y la concentración de ozono en el agua residual.

El mejor oxidante secundario formado de la descomposición del ozono en agua es el radical hidroxilo, como se observa en las ecuaciones (1) y (2).



Groenen Serrano en 2018 Mientras que la desinfección se lleva a cabo principalmente mediante el ozono, el proceso de oxidación puede tener lugar mediante ambos agentes oxidantes, es decir, el ozono y los radicales hidroxilos.

El ozono se transforma sólo en O_2 y H_2O . La principal limitación de este procedimiento, al igual que en todos aquellos que involucran la aplicación de ozono, radica en los gastos asociados a la producción mediante descargas eléctricas, así como en los desafíos vinculados a las restricciones en la transferencia de masa.

V. PROCEDIMIENTO

5.1. MATERIALES

Todos los materiales volumétricos ocupados en este método son de clase A con certificación compatible con la ISO 9000, o en su caso estar calibrado.

5.1.1. REACTIVOS

- Sulfato de níquel hexahidratado, marco Golden bell – Reactivos grado analítico.
- Sulfato ferroso, marca J.T. Baker grado analítico.
- Peróxido de hidrogeno, marca J.T. Baker grado analítico.
- Perlas de hidróxido de sodio, marca J.T. Baker grado analítico.

5.1.2. MATERIAL

- Vaso de precipitado 600 ml
- Vaso de precipitado 250 ml
- Vidrio de reloj
- Espátula
- Pipeta graduada 1 ml
- Propipeta
- Celdas para espectrofotómetro
- Agitador magnético
- Electrodo de Aluminio
- Píseta con agua destilada
- Embudo de separación

5.1.3. EQUIPO

- Balanza analítica
- Termo agitador
- Potenciómetro
- Espectrofotómetro

- Ozonificador de marca VTAR, condiciones: una producción de ozono 500 mg/h, con set ajustable de 30 a 360 minutos, con una corriente de 100 ~ 240 V /DC12V/ 60Hz.
- Ultrasonido marca Westprime Systems, modelo B90-055H condiciones: 2 AMP, con una corriente de 100/50/60 Hz.
- Fuente de alimentación de voltaje regulable.

5.2. PROCEDIMIENTO

5.2.1. PROCEDIMIENTO GENERAL

Se elaboro en laboratorio, se utilizó 2.15 g de sulfato de Níquel hexahidratado mezclado en un vaso de precipitado con 600 ml de agua destilada ($\text{NiSO}_4 + 6\text{H}_2\text{O}$), para obtener una concentración de 60 ppm.

Luego se prepara el reactivo Fenton, para esta parte se hace una reacción adicionando a la solución de Sulfato Ferroso (FeSO_4) y Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2), generando:

FeSO_4 150 mg/L + H_2O_2 500 mg/L.

Para una solución de 600 ml de agua destilada se usó 90 mg de FeSO_4 y 0.300 ml de H_2O_2 . La cantidad de FeSO_4 cambia con respecto a la concentración que se utilice, para una concentración de 150 ppm se usa 90 mg, para 300 ppm son 180 y para una concentración de 450 se usa 270 mg para una mezcla homogénea.

Teniendo las soluciones se coloca un agitador magnético dentro de los vasos en un termo agitador a 600 rpm durante 40 minutos para que la mezcla sea homogénea. Una vez obtenida la solución Fenton se separa la mezcla en 2 vasos de precipitados para ajustar el pH para lo cual se ocupa un potenciómetro que se deberá calibrar antes de la medición, se adicionará hidróxido de sodio en polvo hasta llegar al pH indicado, en este caso pH 8 y 10.

Se realiza una curva de calibración con 0.25, 0.5, 1.0, 1.5 y 2.5 ml de la solución de níquel a 8 y 10 pH, se mide en el espectrofotómetro a 680 nm en el espectrofotómetro, con este podemos sacar la ecuación que nos ayuda a medir la remoción.

5.2.2. TRATAMIENTO OZONIFICACIÓN

Se coloca 100 ml de la solución de Níquel en un vaso de precipitado de 250 ml, posteriormente se agrega 100 ml del reactivo Fenton en el vaso, se coloca en el ozonificador de marca GZYLING con especificaciones de 500 mg/h.AC110 V/60Hz, donde se dejará actuar durante 30' y 60', en cada intervalo de tiempo se tomo una muestra para ser medida en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 680 nm.

Se dejo reposar durante todo un día en un embudo de separación para medir los lodos que se generan en los tratamientos y medir la cantidad de agua tratada en cada proceso tanto con pH 8 como con pH de 10.

Una vez recuperada el agua tratada se prosigue a medir el pH final del tratamiento y se toma una muestra en las celdas para poder medir la longitud de onda a 680 nm.

5.2.3. TRATAMIENTO DE ULTRASONIDO

Se coloca en un vaso de precipitado de 250 ml la misma cantidad de solución de Níquel y Fenton, para este tratamiento se ocupo 100 ml de cada solución y se coloco en una tina de ultrasonido Westprime Systems con especificaciones de 110/50/60 Hz y 2.5 A, se coloca el cronometro a 30' y se realiza otro intervalo para los 60', en cada intervalo se tomo una muestra para ser medida en un espectrofotómetro de a una longitud de onda de 680 nm.

Se deja las muestras de pH 8 y 10 en embudos de separación donde los lodos que se generan son medidos y se ocupa el agua tratada recuperada para proceder a medir en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 680 nm y el pH final del tratamiento para medir su remoción.

5.2.4. TRATAMIENTO FENTON

En el proceso de tratamiento general para el Fenton, se coloca 100 ml de solución de Níquel con 100 ml de solución Fenton en un vaso de 250 ml.

5.2.5. FENTON

El tratamiento Fenton se realizó el siguiente procedimiento, se colocó en un vaso de precipitado de 250 ml la misma cantidad de Níquel que reactivo Fenton, siendo esta una relación de 100 ml de reactivo de níquel, mientras se agregaba lentamente el reactivo oxidante, este sobre una parrilla de agitación con su agitador en el interior del vaso para obtener una solución homogénea. Se dejó en agitación durante 30 minutos posteriormente se deja actuar el reactivo Fenton sin agitación otros 30 minutos, se tomaron muestras en ambos tiempos y se midió a una longitud de onda de 680 nm.

Las muestras con pH 8 y 10 se colocan en embudos de separación, donde se miden los lodos generados, y se utiliza el agua tratada recuperada para llevar a cabo la medición en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 680 nm. Posteriormente, se determina el pH final del tratamiento para evaluar su eficacia en términos de remoción.

VI. RESULTADOS

I. ESTANDARIZACIÓN MÉTODO (CUANTIFICACIÓN DE NI)

$$y = mx + b$$

Esta ecuación de la recta representa la relación entre la absorbancia y la concentración de Níquel, donde y es la absorbancia de la solución de Níquel, x la concentración de la misma y m es la pendiente de la recta del factor de calibración, b es el valor de intersección de absorbancia.

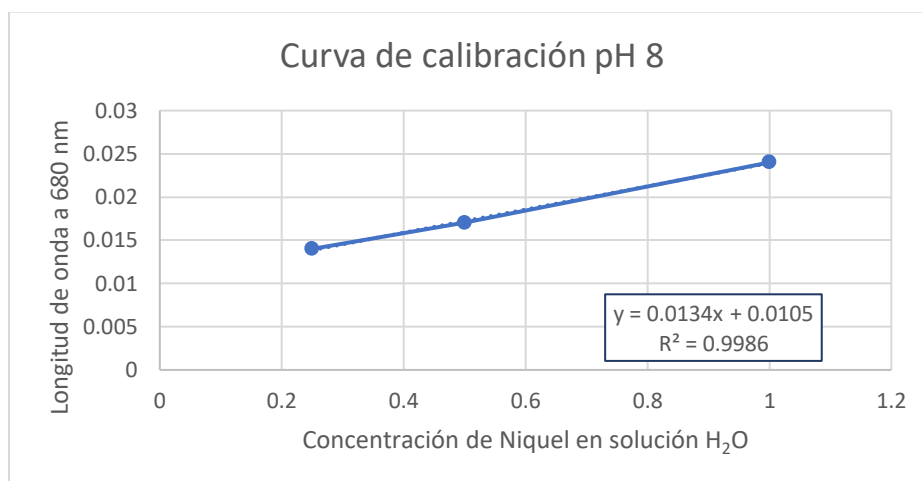
Se ocupa la ecuación obtenida para realizar los siguientes cálculos

Curva de calibración

Tabla 6. Muestras para la calibración

mL	680	486	490
0.25	0.001	0.002	-0.002
0.5	0.014	0.012	0.011
1	0.017	0.02	0.018

Gráfico 1. Curva de calibración pH 8



La curva de calibración la ocupamos para determinar la concentración de Níquel en una solución de agua, obteniendo la ecuación de la recta para determinar la concentración, para pH 8 y 10.

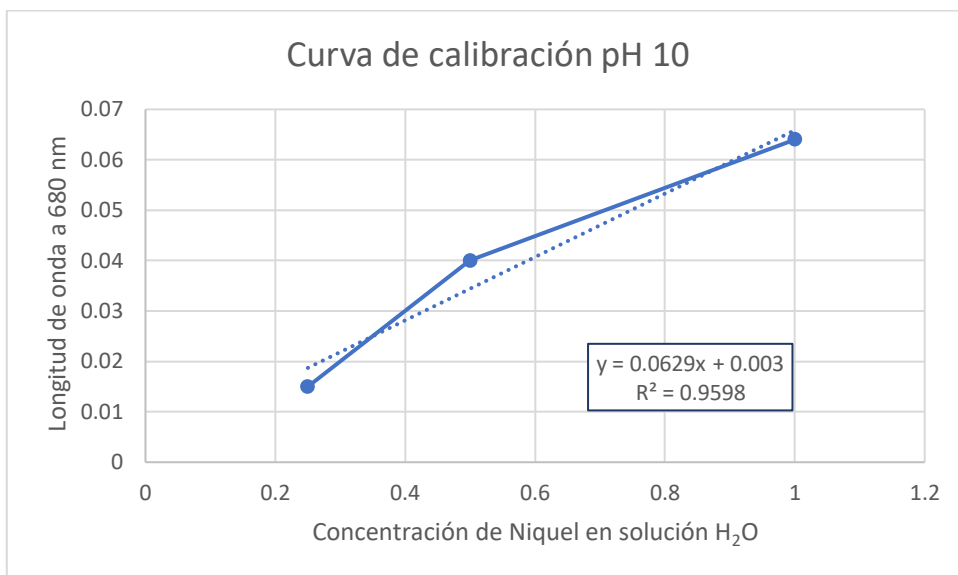
$$S = 0.0013435$$

$$R^2 = 0.9986$$

Tabla 7. Muestras para la calibración

mL	680	486	490
0.25	0.001	0.002	-0.002
0.5	0.014	0.012	0.011
1	0.017	0.02	0.018

Gráfico 2. Curva de calibración pH 10



La curva de calibración la ocupamos para determinar la concentración de Níquel en una solución de agua, obteniendo la ecuación de la recta para determinar la concentración, para pH 8 y 10.

$$S = 0.0756$$

$$R^2 = 0.9598$$

II. COMPARAR CONDICIONES DE PH ÁCIDOS Y BÁSICOS EFECTIVOS EN LA REMOCIÓN DE NÍQUEL USANDO POA'S.

Tabla 8. Comparación de porcentaje de remoción de Níquel en pH ácidos y básicos.

Tratamiento	pH ácidos						
	pH	% Remoción					
		150		300		450	
		30'	60'	30'	60'	30'	60'
Fenton	2	48	60	15	32	0	50
	3	0	0	0	16.7	0	50
	pH básicos						
	pH	% Remoción					
		150		300		450	
		30'	60'	30'	60'	30'	60'
	8	88.62	98.82	90.63	91.36	75.31	78.54
	10	89.67	89.67	77.24	98.98	98.35	99.95

El tratamiento Fenton fue realizado a dos condiciones diferentes de pH y se sometió a experimentación con tres concentraciones diferentes de Fenton, como se muestra en la tabla se comparan a 150, 300 y 450 ppm, donde se aprecian la comparación del tratamiento a pH, 2 y 3, siendo estos los tratamientos con remoción a pH ácido, en el cual se observa que a un Ph ácido los porcentajes de remoción son menor de un 75% y ese el porcentaje mínimo para poder decir que tenemos una dosis eficiente de reducción, se muestra que a una concentración mayor el porcentaje de reducción aumenta.

Por otro lado, en la tabla de resultados con el tratamiento Fenton a un pH de 8 y 10, estos siendo pH básicos, se observa que los porcentajes son mayores de 75% por lo cual, el tratamiento aplicado en estas condiciones tiene mejor resultado, al igual que en el tratamiento a pH ácidos, la remoción es proporcional a su concentración en un pH de 10 por lo contrario a un pH 8 a menor concentración se obtuvo una mayor reducción.

Tabla 9. Comparación de porcentaje de remoción con pH básicos utilizando ozonificación y baño de ultrasonido,

Tratamiento	pH ácidos						
	pH	% Remoción					
		150		300		450	
		30'	60'	30'	60'	30'	60'
Ozono	8	71.46	98.94	86.63	99.69	63.62	95.34
	10	74.67	99.12	61.62	99.74	80.78	99.26
Ultrasonido	8	96.21	96.21	96.46	96.46	73.45	92.6
	10	85.85	81.34	89.05	96.9	89.4	94.6

En la tabla anterior se muestran los porcentajes de remoción a pH básicos, utilizando pH de 8 y 10, se utilizaron dos tratamientos, la ozonificación en la cual se añadió 110V/60Hz durante 30' y 60', y un baño de ultrasonido donde se añadió la misma frecuencia para poder realizar la comparación.

En el tratamiento de ozonificación se muestran los resultados siendo efectivos con un porcentaje de remoción mayor a 75%, se observa que en un pH 8, la remoción final, tiene un resultado favorable a una concentración de 300 ppm, el tratamiento se realizo durante una hora en este se oxido el hierro y esto provoco que cambiara la colorimetría de la solución, a un tiempo 0' se observa un color amarillo, durante el tratamiento hasta que finalizo se observo un cambio a color negro.

Utilizando el baño de ultrasonido y aplicando la misma frecuencia, el porcentaje de remoción favorable fue 300 ppm, este tratamiento, se observa una remoción mayor al 75% y además de que se mantuvo constante, en donde debido a las condiciones del ultrasonido hizo que acelerada la solución y lo dispersara debido a las ondas que se genera, cabe destacar que en este procedimiento basto con un tiempo medio de lo propuesto para llegar a dicha remoción.

Por otro lado, tenemos el ozono con la solución de níquel a pH 10 en donde a los 60 minutos se obtuvo que las 3 concentraciones se mantuvieron en el mismo porcentaje de remoción, debido a que el comportamiento de los radicales OH reacciona con eficacia y además de que a la hora propuesta ya presentaba un porcentaje alto de remoción. Cabe mencionar que al paso del tiempo ocurrió una reacción en donde nuestra solución se oscureció provocando una oxidación.

En el caso del ultra, en altas concentraciones 300 ppm y 450 ppm se obtuvo mayores porcentajes de remoción debido a las reacciones que intervinieron que es el ultrasonido (equipo) y el cambio de pH a nuestra solución de níquel, donde sucede la cavitación; provocado por las ondas del equipo y debido a este proceso impulsa los radicales OH en la reacción Fenton.

III. EVALUAR LA CONCENTRACIÓN-DOSIS EFECTIVA DE TRATAMIENTOS CONVENCIONALES DE FLOCULACIÓN Y POAS COMO PARÁMETRO DE RESPUESTA DE REMOCIÓN DE NÍQUEL.

Tabla 10. Tabla de POAs de remoción de níquel

OZONIFICACIÓN						FENTON					
PH 8			PH 10			PH 8			PH 10		
150	60.39	60'	150	99.12	60'	150	98.82	60'	150	89.67	60'
300	93.72	60'	300	99.74	60'	300	91.36	60'	300	98.98	60'
450	71.08	60'	450	99.26	60'	450	78.54	60'	450	99.95	60'
ULTRASODINO						ELECTRO FENTON					
PH 8			PH 10			PH 8			PH 10		
150	96.21	60'	150	81.34	60'	150	76.68	60'	150	78.92	60'
300	96.46	60'	300	96.9	60'	300	92.23	60'	300	65.49	60'
450	92.6	60'	450	94.6	60'	450	73.07	60'	450	70.09	60'

En la tabla se observa que la remoción de níquel en diferentes tratamientos son dispersos en cuanto a resultados debido a que son en las condiciones que se trate, cabe mencionar que para tener una mayor efectividad se considera un 75% de remoción, y a mayor concentración en el electro fenton no es considerado una mala alternativa, pero no cumple con los parámetros requeridos. Por otro lado, donde favoreció y destaco por los altos niveles de porcentaje de remoción fueron en pH 10 en una concentración de 300 y 450 ppm donde la diferencia es mínima y la similitud destaca por el alto índice de remoción.

IV. EVALUAR LOS TRENES DE TRATAMIENTOS DE LOS POAS EFECTIVOS QUE PERMITAN EL RE-USO DE EFLUENTE EN OTROS PROCESOS UNITARIOS CONVENCIONALES.

Los trenes de tratamiento vistos y realizados, contemplan información de todo el proceso, estándares y condiciones en las que se sometió para la eliminación de la solución níquel en el agua, cabe resaltar que todos son procedimientos eficientes, ya que este proyecto trata sobre la ozonificación para la remoción de níquel, debido a que en concentraciones bajas el proceso no destacó con su porcentaje de remoción, a diferencia de mayores concentraciones (300 ppm y 450 ppm) donde su comportamiento fue favorable para la remoción de níquel, tuvo mejores resultados y se hizo notar por el tiempo propuesto. No obstante se puso en duda respecto al pH10 en donde durante el proceso formaba una tonalidad oscura, pero con resultados de remoción efectiva, y pasando el reposo era poco más efectivo y con lo sedimentado se lograba un agua de tonalidad incolora.

V. COMPARACIÓN DE ELECTROCOAGULACIÓN CON LA APLICACIÓN DE DIFERENTES ELECTRODOS PARA REMOCIÓN DE NÍQUEL

Tabla 11. Comparación de electrocoagulación

ALUMINIO						COBRE					
PH 8			PH 10			PH 8			PH 10		
150	76.68	60'	150	78.92	60'	150	81.90	60'	150	83.64	60'
300	92.23	60'	300	73.07	60'	300	88.37	60'	300	71.95	60'
450	73.07	60'	450	70.08	60'	450	61.75	60'	450	75.81	60'
CARBON						ZINC					
PH 8			PH 10			PH 8			PH 10		
150	93.84	60'	150	81.03	60'	150	82.90	60'	150	86.38	60'
300	93.35	60'	300	65.36	60'	300	88.74	60'	300	59.02	60'
450	69.39	60'	450	69.47	60'	450	70.46	60'	450	67.97	60'

En el siguiente tabla podemos observar la remoción de níquel con la intervención de los electrodos como protagonistas del proceso y poder determinar que debido a las concentraciones y a sus condiciones (voltaje y al amperaje) se comportara variadamente, como se puede observar que la información recabada no va de un mayor o menor debido a los pH o concentraciones, mas que nada en el proceso electro se puede tomar como un estándar para posibles resultados en donde se puede jugar con los valores de condiciones (voltaje y amperaje). Ademas de que en donde se tuvo mayor remoción de níquel fue en el pH 8 donde valores altos, que pasan a los de pH 10, tienen mayor eficacia, se considera una remoción muy buena.

VI. CONCLUSIONES

De los datos recopilados en los diferentes tipos de oxidación; hechas en el laboratorio, en donde intervino el proceso fenton, fenton-ozono y fenton-ultrasonido se tomó para el estudio de la remoción de dichas evaluaciones 3 parámetros que fueron el pH en 8 y 10, las concentraciones del reactivo fenton (150 ppm, 300ppm y 450ppm) y el tiempo que se considero para tener una reacción (al tiempo 0, 30 minutos y 60 minutos), como era de esperarse; llegamos a conclusiones en donde las remociones son variadas y en otras no, a pesar de la diferencia que hay de una de otra, cabe destacar que esto varia por las concentraciones y por los tiempos propuestos.

El de mejor resultado fue el de pH 10 tanto a los 60 minutos como en reposo, por otro lado, tenemos al pH 8 donde fue favorable, pero presento mínimas decadencias de eficiencia ya sea por el tiempo o concentraciones del proceso. Ya que el tiempo estimado se nota un resultado favorable en la concentración de pH 10 debido al potencial hidrogeno. No queremos determinar que uno es mejor que los demás, solo la eficiencia de los resultados obtenidos es muy satisfactoria.

Por último, la comparativa del fenton-ozono, con respecto a las demás es poco variado debido en que la concentración de pH 8; en los tiempos de 30 minutos la remoción era satisfactoria y al tiempo 60 minutos era poco más satisfactoria, como logramos observar el tiempo es un aliado ya que en reposo a la misma concentración de pH eran muy satisfactorias, con esto lográbamos la sedimentación y decantamos el lodo y se tomo la muestra de nuestro proceso ya tratado. A diferencia del pH 10; el fenton-ozono, se comportó diferente debido a que desde el principio mostraba resultados muy favorables en los 30 minutos y un poco mas a los 60 minutos, al igual se le aplico el proceso de sedimentación y se tuvo resultados muy satisfactorios.

VII. ANEXOS

RESULTADOS DE REMOCIÓN

Tabla 12. Resultados de absorción y medición de remoción a 150 ppm.

PH 8		ABS	REMOCIÓN	
0'	SIN TRATAMIENTO	2.945		0
30'	OZONO	1.389	42.87	71.46
	FENTON	0.102	-53.17	88.62
	ULTRASONIDO	0.041	-57.72	96.21
	CARBON	0.052	-56.90	94.84
60'	OZONO	1.3	36.23	60.39
	FENTON	0.02	-59.29	98.82
	ULTRASONIDO	0.041	-57.72	96.21
	CARBON	0.06	-56.31	93.84
PH 10		ABS	REMOCIÓN	
0'	SIN TRATAMIENTO	-0.004		0
30'	OZONO	0.367	-44.80	74.67
	FENTON	0.151	-53.80	89.67
	ULTRASONIDO	0.206	-51.51	85.85
	COBRE	0.15	-49.59	82.65
60'	OZONO	0.528	-38.10	63.49
	FENTON	0.002	59.99	99.98
	ULTRASONIDO	0.271	-48.80	81.34
	COBRE	0.142	-50.19	83.64

Gráfico 3. Remoción a 150 ppm

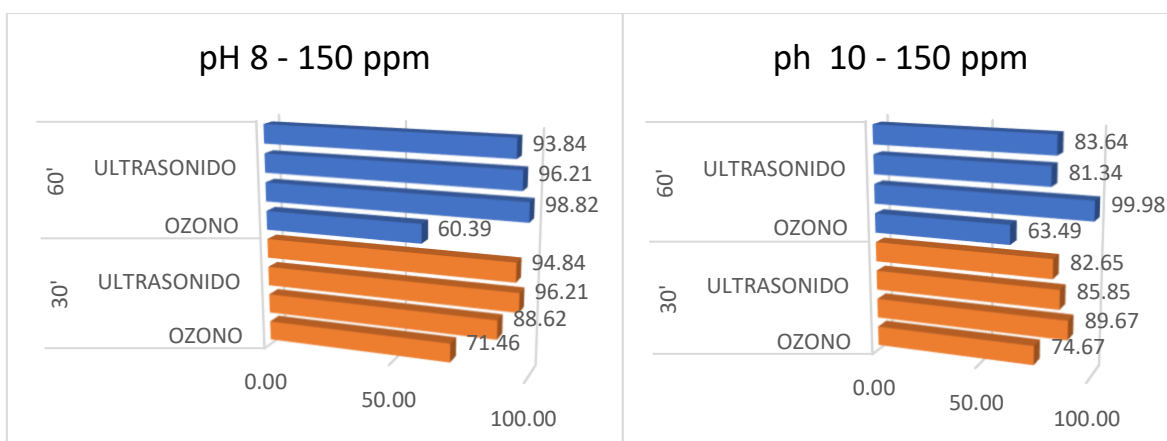


Tabla 13. Resultados de absorción y medición de remoción a 300 ppm

PH 8		ABS	REMOCIÓN	
0'	SIN TRATAMIENTO	0.017		0
30'	OZONO	0.118	-51.98	86.63
	FENTON	0.088	-54.22	90.36
	ULTRASONIDO	0.039	-57.87	96.46
	CARBON	0.05	-57.05	95.09
60'	OZONO	0.061	-56.23	93.72
	FENTON	0.08	-54.81	91.36
	ULTRASONIDO	0.039	-57.87	96.46
	CARBON	0.064	-56.01	93.35
PH 10		ABS	REMOCIÓN	
0'	SIN TRATAMIENTO	0.008		0
30'	OZONO	0.555	-36.97	61.62
	FENTON	0.33	-46.35	77.24
	ULTRASONIDO	0.16	-53.43	89.05
	ALUMINIO	0.289	-39.22	65.36
60'	OZONO	0.833	-25.39	42.31
	FENTON	0.017	-59.39	98.98
	ULTRASONIDO	0.047	-58.14	96.90
	ALUMINIO	0.288	-39.29	65.49

Gráfico 4. Remoción a 300 ppm

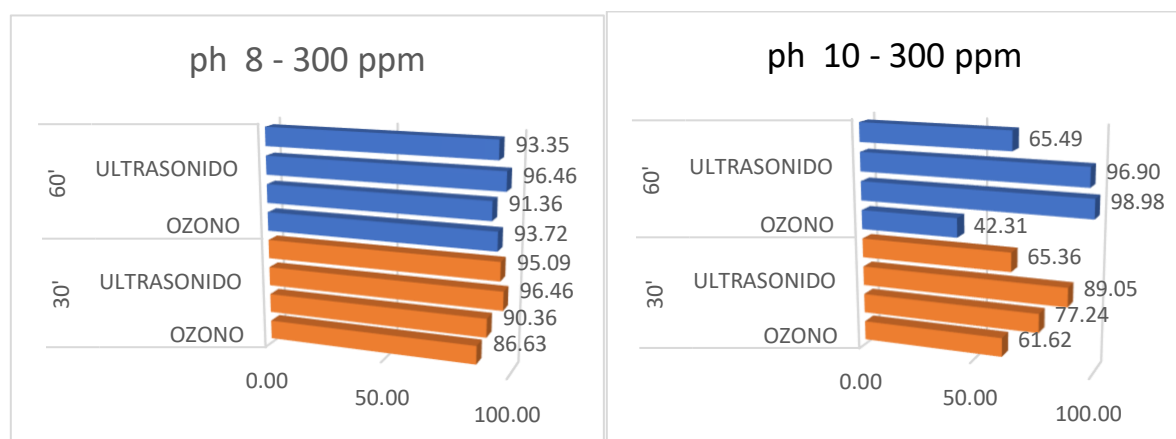


Tabla 14. Resultados de absorción y medición de remoción a 450 ppm.

PH 8		ABS	REMOCIÓN	
0'	SIN TRATAMIENTO	0.036		0
30'	OZONO	0.303	-38.17	63.62
	FENTON	0.209	-45.19	75.31
	ULTRASONIDO	0.224	-44.07	73.45
	ALUMINIO	0.245	-42.50	70.83
60'	OZONO	0.243	-42.65	71.08
	FENTON	0.183	-47.13	78.54
	ULTRASONIDO	0.07	-55.56	92.60
	ALUMINIO	0.227	-43.84	73.07
PH 10		ABS	REMOCIÓN	
0'	SIN TRATAMIENTO	0.043		0
30'	OZONO	0.279	-48.47	80.78
	FENTON	0.026	-59.01	98.35
	ULTRASONIDO	0.155	-53.64	89.40
	ALUMINIO	0.157	-49.07	81.78
60'	OZONO	0.514	-38.68	64.47
	FENTON	0.003	-59.97	99.95
	ULTRASONIDO	0.08	-56.76	94.60
	ALUMINIO	0.251	-42.05	70.09

Gráfico 5. Remoción a 450 ppm

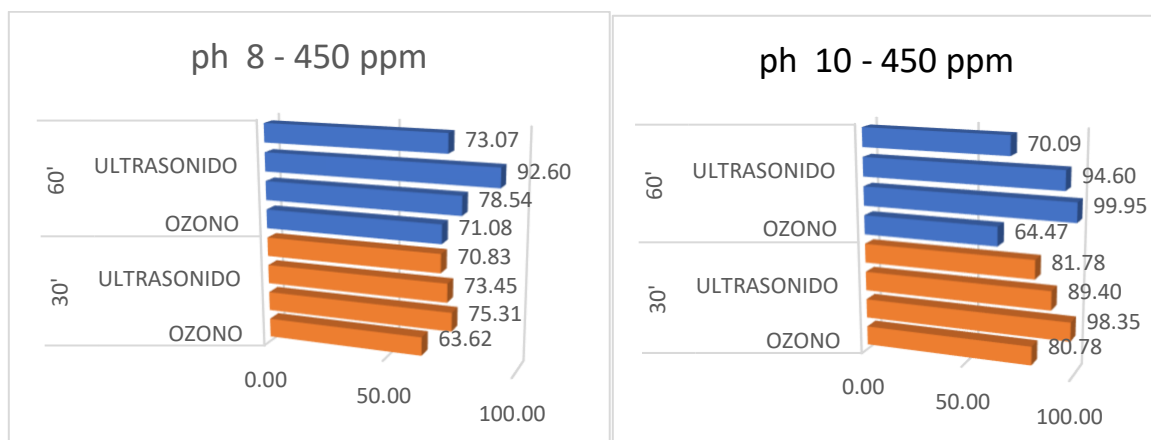


Tabla 15. Resultados de absorción y medición de remoción a 150 empleando el uso de diferentes electrodos.

PH 8		ABS	REMOCIÓN	
0'	SIN TRATAMIENTO	0.014		0
	150 PPM			
30'	ALUMINIO	0.205	-45.49	75.81
	COBRE	0.145	-49.96	83.27
	CARBON	0.052	-56.90	94.84
	ZINC	0.143	-50.11	83.52
60'	ALUMINIO	0.198	-46.01	76.68
	COBRE	0.156	-49.14	81.90
	CARBON	0.06	-56.31	93.84
	ZINC	0.148	-49.74	82.90
PH 10		ABS	REMOCIÓN	
0'	SIN TRATAMIENTO	0.014		0
	150 PPM			
30'	ALUMINIO	0.181	-47.28	78.79
	COBRE	0.15	-49.59	82.65
	CARBON	0.184	-47.05	78.42
	ZINC	0.137	-50.56	84.27
60'	ALUMINIO	0.18	-47.35	78.92
	COBRE	0.142	-50.19	83.64
	CARBON	0.163	-48.62	81.03
	ZINC	0.12	-51.83	86.38

Gráfico 6. Remoción a 150 ppm con el uso de diferentes cátodos

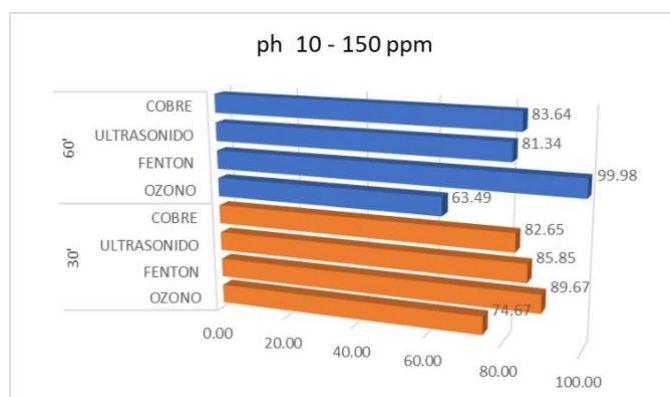
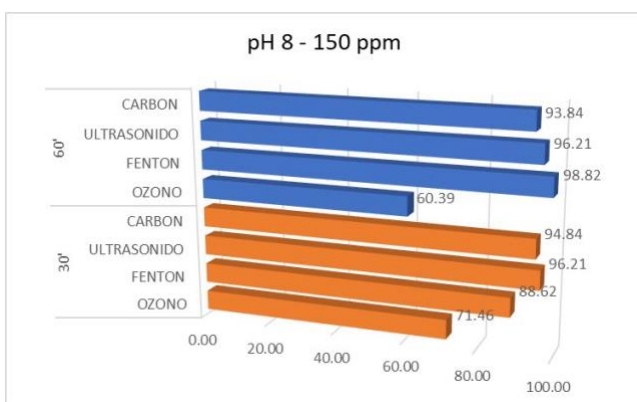


Tabla 16. Resultados de absorción y medición de remoción a 300 ppm empleando el uso de diferentes electrodos.

PH 8		ABS	REMOCIÓN	
0'	SIN TRATAMIENTO	0.014		0
	300 PPM			
30'	ALUMINIO	0.074	-55.26	92.10
	COBRE	0.086	-54.37	90.61
	CARBON	0.05	-57.05	95.09
	ZINC	0.097	-53.54	89.24
60'	ALUMINIO	0.073	-55.34	92.23
	COBRE	0.104	-53.02	88.37
	CARBON	0.064	-56.01	93.35
	ZINC	0.101	-53.25	88.74
PH 10		ABS	REMOCIÓN	
0'	SIN TRATAMIENTO	0.014		0
	300 PPM			
30'	ALUMINIO	0.289	-39.22	65.36
	COBRE	0.335	-35.78	59.64
	CARBON	0.384	-32.13	53.54
	ZINC	0.416	-29.74	49.56
60'	ALUMINIO	0.288	-39.29	65.49
	COBRE	0.236	-43.17	71.95
	CARBON	0.289	-39.22	65.36
	ZINC	0.34	-35.41	59.02

Gráfico 7. Remoción a 300 ppm con el uso de diferentes cátodos

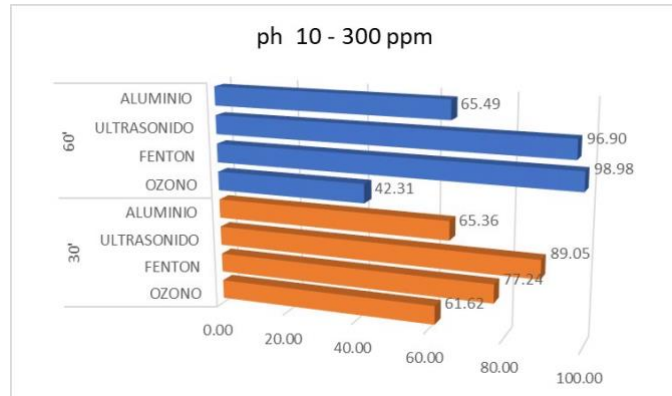
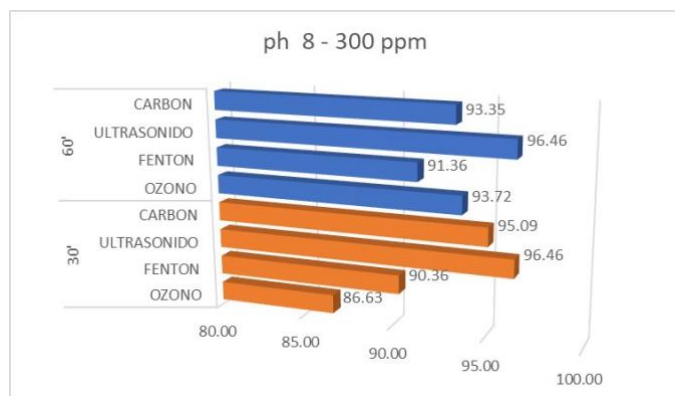
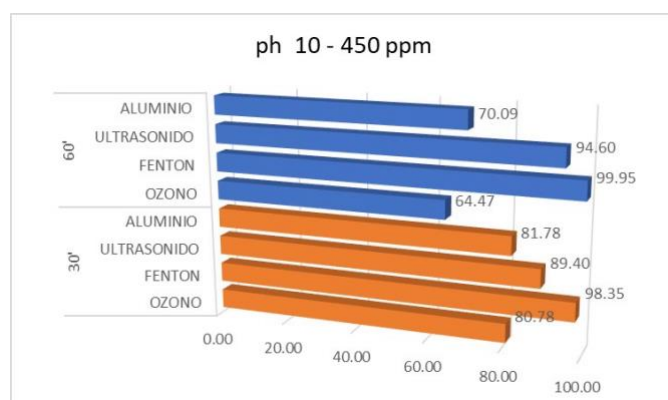
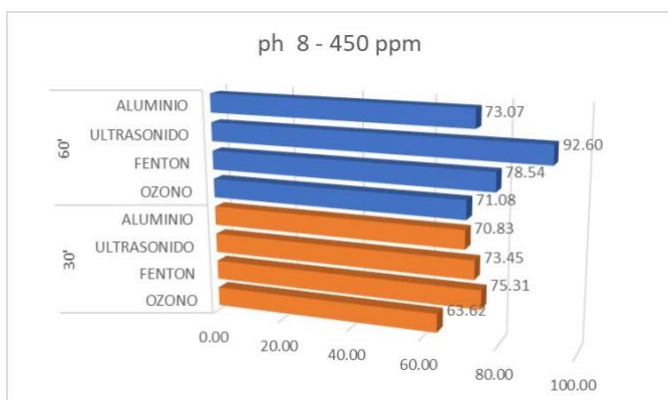


Tabla 17. Resultados de absorción y medición de remoción a 450 ppm empleando el uso de diferentes electrodos.

PH 8		ABS	REMOCIÓN	
0'	SIN TRATAMIENTO	0.014		0
	450 PPM			
30'	ALUMINIO	0.245	-42.50	70.83
	COBRE	0.318	-37.05	61.75
	CARBON	0.311	-37.57	62.62
	ZINC	0.235	-43.25	72.08
60'	ALUMINIO	0.227	-43.84	73.07
	COBRE	0.318	-37.05	61.75
	CARBON	0.257	-41.60	69.34
	ZINC	0.248	-42.28	70.46
PH 10		ABS	REMOCIÓN	
0'	SIN TRATAMIENTO	0.014		0
	450 PPM			
30'	ALUMINIO	0.157	-49.07	81.78
	COBRE	0.221	-44.29	73.82
	CARBON	0.268	-40.78	67.97
	ZINC	0.234	-43.32	72.20
60'	ALUMINIO	0.251	-42.05	70.09
	COBRE	0.205	-45.49	75.81
	CARBON	0.256	-41.68	69.47
	ZINC	0.268	-40.78	67.97

Gráfico 8. Remoción a 450 ppm con el uso de diferentes cátodos



Uso del ozono como agente oxidante en la desinfección de aguas. Una revisión

Olaya Pirene Castellanos-Onorio¹, Mario Díaz-González¹, Maribel López-Ramírez¹,
Miguel Ángel López-Ramírez², Gerardo González-Gómez², Leonides Sánchez-Mota²,
Guadalupe Rodríguez Martínez³

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Veracruz, Av. Miguel Ángel de Quevedo 2779, Formando Hogar, 91897 Veracruz, Ver

²Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Martínez de la Torre, Cmo. a Cartago s/n, Vega Redonda, 93610 Martínez de la Torre, Ver

³Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Km 1.8 Carretera Lomas del Cojolite, 93821 Misantla, Ver

Resumen

El ozono es uno de los desinfectantes químicos de mayor eficacia, esto debido a su alta capacidad oxidante, el cual ha sido en los últimos años utilizado en los tratamientos de aguas residuales, de cualquier índole, esto porque las actividades de desinfección son consideradas como los mecanismos principales en la desactivación o destrucción de los organismos patógenos para prevenir la dispersión de enfermedades transmitidas a través del agua. Es muy importante que las aguas residuales sean tratadas adecuadamente antes de realizarse las actividades de desinfección para que la acción de cualquier desinfectante sea eficaz. Tradicionalmente, dicho control se lleva a cabo mediante procesos químicos de desinfección con halógenos, principalmente compuestos de cloro, a pesar de los riesgos que éste implica, tanto a nivel laboral (de manipulación y almacenamiento), como a nivel de impacto ambiental, ya que, además del cloro residual presente en el vertido, se generan productos secundarios de oxidación muy persistentes y peligrosos, como los trihalometanos, de probado carácter cancerígeno. Es por eso por lo que este presente estudio se encarga de una recopilación bibliográfica del uso del ozono como agente reductor de contaminantes.

Abstract

Ozone is one of the most effective chemical disinfectants, due to its high oxidizing capacity, which in recent years has been used in wastewater treatments of any kind, this is because disinfection activities are considered the mechanisms main in the deactivation or destruction of pathogenic organisms to prevent the spread of waterborne diseases. It is very important that wastewater is adequately treated before disinfection activities are carried out so that the action of any disinfectant is effective. Traditionally, said control is carried out through chemical disinfection processes with halogens, mainly chlorine compounds, despite the risks that this implies, both at the work level (handling and storage), and at the level of environmental impact, since in addition to the residual chlorine present in the discharge, very persistent and dangerous secondary oxidation products are generated, such as trihalomethanes, which are proven carcinogenic. That is why this study is responsible for a bibliographic compilation of the use of ozone as a pollutant reducing agent.

Palabras Clave: Ozono, procesos químicos, impacto ambiental

Keywords: Ozone, chemical processes, environmental impact

1. INTRODUCCIÓN

La desinfección de aguas y aguas residuales es una etapa necesaria para asegurar la protección del medio ambiente y la salud pública. Actualmente existe un interés creciente en el tratamiento de aguas residuales domésticos e industriales con el propósito de disminuir el impacto ambiental y lograr su reuso (Bataller-Venta et al., 2005).

15
AÑOS
2008-2023

ISSN: 2007-4786

1863

TD
Innovación y Desarrollo
Tecnológico

Volumen 15 – Número 4
Octubre – Diciembre 2023

INFORME TÉCNICO FINAL PARA PROYECTOS FINANCIADOS POR EL TECNOLOGICO NACIONAL DE MEXICO

Proyecto: (18441)

I. Identificación del Proyecto

Institución:

Instituto Tecnológico de Veracruz

Responsable Técnico del Proyecto:

CASTELLANOS-ONORIO, OLAYA PIRENE

Clave del proyecto: 18441.23-P

Título del proyecto: Evaluación del proceso de Ozonificación Avanzada (POA) como tratamiento de remoción de contaminante Níquel en aguas residuales industriales

Tipo de investigación: Aplicada

Duración del proyecto: 12 meses

Fecha de inicio del proyecto: 01 de enero del 2023

Fecha de término del proyecto: 31 de diciembre del 2023

II. Resultados

1. Resumen del proyecto

Introducción

Contiene una descripción general de la problemática que aborda el proyecto de investigación.

Desde 1992, año en que se llevó a cabo la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Ambiente y el Desarrollo (UNCED), se ha aceptado el hecho de que el agua es un asunto de interés prioritario, tanto a escala local como global. Así lo corroboran las declaraciones respecto al agua acordadas en la Cumbre de las Américas o los principios de Dublín, tendientes a hacer un uso sustentable de este recurso, por citar algunos ejemplos.

También es a principios de la década de los años noventa que el sector privado ha visto la oportunidad de incrementar su participación en el sector agua, aprovechando la coyuntura para un excelente negocio (Bakker, 2002) ya que sólo en el rubro de agua potable y saneamiento, de acuerdo con la meta de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible, celebrada en 2002 en Johannesburgo, se espera reducir a la mitad la proporción de la población sin acceso al agua potable y servicios básicos de saneamiento antes del año 2015 (PeñaGarcía, 2006), esto debido a que cada vez resulta más obvio la creciente escasez de agua en diversas regiones del planeta, el recrudecimiento de las sequías a raíz del calentamiento global y el crecimiento de la demanda a causa de la expansión continua de las actividades agrícolas e industriales, son en la actualidad (y posiblemente a futuro) fuentes de conflicto entre muchos países e inclusivamente dentro del mismo país ya que, el agua dulce constituye apenas el 2.5% de la totalidad de los recursos hídricos de la Tierra, además que solo el 4.0% de esta fracción se encuentra ubicada en aguas superficiales y en la atmósfera (Fernández-Colón, 2009).

Los recursos hídricos del planeta están sometidos a contaminación física, química y/o biológica además del avance de la actividad humana (industria, agricultura, ganadería, entre otras), el crecimiento demográfico, el desarrollo de las ciudades y la falta de medidas y programas para dar respuesta a dichos cambios, genera un ambiente que favorece al avance de la contaminación. Debido a esto las medidas que se deben tomar para descontaminar los efluentes debe ser cada vez más urgente, siendo necesario la búsqueda de nuevas alternativas basadas en investigaciones sobre diferentes sistemas de tratamiento de aguas que faciliten una mejor calidad y una protección adecuada de los recursos hídricos

2024-01-24 20:53:17 (Z:CDMX) Pág. 1

Participación de Estudiantes

Num. Control	Nombre completo	Institución	Rol(es)	Actividades realizadas
E19020912	López-Ramírez, Maribel	INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VERACRUZ	RESIDENTE	Estandarización metodológica de la preparación de la solución madre de Níquel se utiliza una solución con $\text{Ni}(\text{HNO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ a una concentración de 1000 mg/L $\pm$ 0,02 perteneciente. Se toman 5 mL del estándar y se llevan a 500 mL y posteriormente 2 mL de ácido Nítrico concentrado quedando una solución con una concentración de 10 mg/L. Validación del método analítico: Para realizar la validación es necesario realizar estándares con concentraciones conocidas de Níquel al 30%, 60% y 90%; para conocer los parámetros de calidad instrumental y obtener los límites de cuantificación del equipo de análisis. Posteriormente se ajustarán las variables de análisis (pH, conductividad, temperatura, Amperaje y electrodos) Y Análisis de la eficiencia de remoción de níquel por los tres tratamientos de remoción : Se analizarán las muestras sintéticas preparadas con estándares de níquel, quienes serán sometidos a trenes de tratamiento y POA
E18020067	García - Sánchez, Gilberto	INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VERACRUZ	RESIDENTE	Estandarización metodológica de la preparación de la solución madre de Níquel se utiliza una solución con $\text{Ni}(\text{HNO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ a una concentración de 1000 mg/L $\pm$ 0,02 perteneciente. Se toman 5 mL del estándar y se llevan a 500 mL y posteriormente 2 mL de ácido Nítrico concentrado quedando una solución con una concentración de 10 mg/L. Validación del método analítico: Para realizar la validación es necesario realizar estándares con concentraciones conocidas de Níquel al 30%, 60% y 90%; para conocer los parámetros de calidad instrumental y obtener los límites de cuantificación del equipo de análisis. Posteriormente se ajustarán las variables de análisis (pH, conductividad, temperatura, Amperaje y electrodos) Y Análisis de la eficiencia de remoción de níquel por los tres tratamientos de remoción : Se analizarán las muestras sintéticas preparadas con estándares de níquel, quienes serán sometidos a trenes de tratamiento y POA
E19020164	López - Vázquez, Pamela	INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VERACRUZ	SERVICIO DOCIAL	Estandarización metodológica de la preparación de la solución madre de Níquel se utiliza una solución con $\text{Ni}(\text{HNO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ a una concentración de 1000 mg/L $\pm$ 0,02 perteneciente. Se toman 5 mL del estándar y se llevan a 500 mL y posteriormente 2 mL de ácido Nítrico concentrado quedando una solución con una concentración de 10 mg/L.
E19020879	Barradas - Huesca, Oded Inés	INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VERACRUZ	SERVICIO DOCIAL	Validación del método analítico: Para realizar la validación es necesario realizar estándares con concentraciones conocidas de Níquel al 30%, 60% y 90%; para conocer los parámetros de calidad instrumental y obtener los límites de cuantificación del equipo de análisis. Posteriormente se ajustarán las variables de análisis (pH, conductividad, temperatura, Amperaje y electrodos) Y Análisis de la eficiencia de remoción de níquel por los tres tratamientos de remoción : Se analizarán las muestras sintéticas preparadas con estándares de níquel, quienes serán sometidos a trenes de tratamiento y POA

6. Difusión

El presente trabajo fue presentado como una ponencia en la Red Iberoamericana de Academias de Investigación, A.C. en el marco del CIFCA 2023 Zona Sur Congreso Internacional de Fortalecimiento de Cuerpos Académicos y Grupos de Investigación con la ponencia denominada EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTE NIQUEL EN AGUAS RESIDUALES USANDO POA'S COMO TRATAMIENTO CONVENCIONAL, la cual fue presentada bajo la clave M1-004 en la MESA 1. INNOVACION TECNOLÓGICA, realizados del 25 al 27 de octubre del año 2023

VIII. FUENTES DE INFORMACIÓN

Agriculture, Ecosystems and Environment, 108:57–71.

Arslan-Alaton I. (2003). A review of the effects of dye-assisting chemicals on advanced oxidation of reactive dyes in wastewater. *Coloration Technology*, 119: 345-353.
<https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2003.tb00196.x>

CONAGUA. 2010. Estadísticas del Agua en México, edición 2010.

De la Peña Jorge Ducci, Zamora Plascencia., M. E. V. (2013, 25 mayo). Tratamiento de aguas residuales en México. Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado 6 de 63 mayo de 2022, de https://agua.org.mx/wpcontent/uploads/2018/02/Tratamiento_de_aguas_residuales_en_Mexico2013.pdf

Environmental Protection Agency (EPA). 2001. A Citizen's Guide to Phytoremediation. EPA 542-F-01-002. 2p.

Fernandez, C. D. (2016). Estudios de un sistema electro-Fenton basado en el acoplamiento de un lecho empacado de carbón activado y resinas para el tratamiento de aguas residuales. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica.

Glynn Henery, J. (1989). Water pollution. In: Heinke, G.W., Glynn Henery, J. (Eds.), *Environmental Science and Engineering*.

https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/00_mensajes/06_agua.ht

Jiménez Cisneros, B., Torregrosa y Armentia, M., & Aboites Aguilar, L. (2010). El Agua en México: cauces y encauces. Academia Mexicana de Ciencia.

Kivaisi, A. 2001. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review. *Ecol. Eng.* 16:545-560.

Lucho, C.A., Prieto, F., Del Razo, L.M., Rodríguez, R. and Poggi, H. (2005b). Chemical fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico. *ml*

Muñoz Andrés, V., Rodríguez Álvarez, Jesús.(2019). Bases de la Ingeniería Ambiental. Editorial UNED.

Resúmenes de salud pública - Níquel. (6 de Mayo de 2016). Obtenido de Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades:https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs15.html

Rittmann Bruce, E., McCarty Perry, L. (2001) Environmental Biotechnology: Principles and Applications. McGraw-Hill Education.

Sanz, J.; Lombraña, J. I., y De Luis, A. (2013). Estado del arte en la oxidación avanzada a efluentes industriales: nuevos desarrollos y futuras tendencias. Afinidad LXX, 561: 25-33. <https://n9.cl/3hrea>

Secretaría de Gobierno. (2022, marzo 11). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales . (2014). SEMARNAT. Obtenido de

Silva, S. H. 2006. La situación regional del saneamiento en América Latina. Organización Panamericana de la Salud. URL: <http://www.imta.gob.mx/gaceta/anteriores/g23-03-2009/situacion-saneamiento-lac.pdf>.