



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**OXIDACIÓN ANÓDICA ELECTROLÍTICA DEL COMPUESTO AROMÁTICO ACID RED 1,
CONTENIDO DE TINTE DEL 60 % (Amido Naftol Rojo G) UTILIZADO EN LA INDUSTRIA
TEXTIL, EMPLEANDO UN ÁNODO DE DIÓXIDO DE RUTENIO SOBRE TITANIO Y UN
CÁTODO DE FIELTRO DE GRAFITO, A NIVEL DE LABORATORIO**

Lucía Jimena Baiza García

Asesorado por Ing. Cesar Alfonso García Guerra

Co Asesorado por Dr. Gilberto Carreño Aguilera

Guatemala, agosto de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**OXIDACIÓN ANÓDICA ELECTROLÍTICA DEL COMPUESTO AROMÁTICO ACID RED 1,
CONTENIDO DE TINTE DEL 60 % (Amido Naftol Rojo G) UTILIZADO EN LA INDUSTRIA
TEXTIL, EMPLEANDO UN ÁNODO DE DIÓXIDO DE RUTENIO SOBRE TITANIO Y UN
CÁTODO DE FIELTRO DE GRAFITO, A NIVEL DE LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUCÍA JIMENA BAIZA GARCÍA

ASESORADO POR ING. CESAR ALFONSO GARCÍA GUERRA
CO ASESORADO POR DR. GILBERTO CARREÑO AGUILERA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lémus
EXAMINADORA	Inga. Mercedes Esther Roquel Chávez
EXAMINADORA	Inga. Dinna Lissette Estrada Moreira de Rossal
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

OXIDACIÓN ANÓDICA ELECTROLÍTICA DEL COMPUESTO AROMÁTICO ACID RED 1, CONTENIDO DE TINTE DEL 60 % (Amido Naftol Rojo G) UTILIZADO EN LA INDUSTRIA TEXTIL, EMPLEANDO UN ÁNODO DE DIÓXIDO DE RUTENIO SOBRE TITANIO Y UN CÁTODO DE FIELTRO DE GRAFITO, A NIVEL DE LABORATORIO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería de Ingeniería Química, con fecha 24 de mayo de 2019.

Lucía Jimena Baiza García

UNIVERSIDAD DE
GUANAJUATO



Guanajuato, Gto., México 29 de septiembre de 2020

Ingeniero

Williams Guillermo Álvarez

DIRECTOR

Escuela de Ingeniería Química

Presente

Estimado Ingeniero Williams Guillermo Álvarez:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y aprobado el informe final del trabajo de graduación titulado **"OXIDACIÓN ANÓDICA ELECTROLÍTICA DEL COMPUESTO AROMÁTICO ACID RED 1, CONTENIDO DE TINTE DEL 60% (Amido Naftol Rojo G) UTILIZADO EN LA INDUSTRIA TEXTIL, EMPLEANDO UN ÁNODO DE DIÓXIDO DE RUTENIO SOBRE TITANIO Y UN CÁTODO DE FIELTRO DE GRAFITO, A NIVEL DE LABORATORIO"**, elaborado por la estudiante de Ingeniería Química, **Lucía Jimena Baiza García**, quien se identifica con el registro académico **2014-04379** y con el CUI No. **2924 39067 0101**.

Agradeciendo su atención a la presente, me suscribo a usted.

Atentamente

DR. GILBERTO CARREÑO AGUILERA

DIRECTOR DEL DEPARTAMENTO DE GEOMÁTICA E HIDRÁULICA
UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO, DIVISIÓN DE INGENIERÍAS



UNIVERSIDAD
DE GUANAJUATO
CAMPUS GUANAJUATO
DIVISION DE INGENIERIAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA
GEOMATICA E HIDRAULICA

Guatemala, 25 de noviembre de 2020

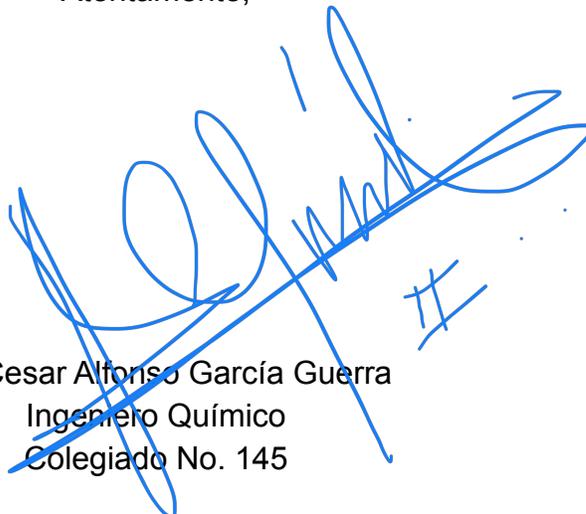
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Presente

Estimado Ingeniero Williams Guillermo Álvarez:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y aprobado el informe final del trabajo de graduación titulado: **“OXIDACIÓN ANÓDICA ELECTROLÍTICA DEL COMPUESTO AROMÁTICO ACID RED 1, CONTENIDO DE TINTE DEL 60% (Amido Naftol Rojo G) UTILIZADO EN LA INDUSTRIA TEXTIL, EMPLEANDO UN ÁNODO DE DIÓXIDO DE RUTENIO SOBRE TITANIO Y UN CÁTODO DE FIELTRO DE GRAFITO, A NIVEL DE LABORATORIO”**, elaborado por el estudiante de Ingeniería Química, **Lucía Jimena Baiza García**, quien se identifica con el registro académico **2014-04379** y con el CUI No. **2924 39067 01 01**.

Agradeciendo su atención a la presente, me suscribo de usted.

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a final flourish, positioned above the typed name.

Ing. Cesar Alfonso García Guerra
Ingeniero Químico
Colegiado No. 145



Guatemala, 09 de abril de 2021.
Ref. EIQ.TG-IF.011.2021.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **092-2019**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Lucía Jimena Baiza García.**

Identificado con número de carné: **2924390670101.**

Identificado con registro académico: **201404379.**

Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química.**

En la modalidad: **Diseño de Investigación, Intercambio Académico y Movilidad Estudiantil.**

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

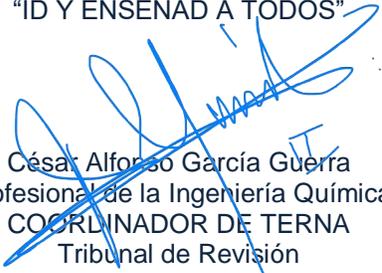
OXIDACIÓN ANÓDICA ELECTROLÍTICA DEL COMPUESTO AROMÁTICO ACID RED 1, CONTENIDO DE TINTE DEL 60% (Amido Naftol Rojo G) UTILIZADO EN LA INDUSTRIA TEXTIL, EMPLEANDO UN ÁNODO DE DIÓXIDO DE RUTENIO SOBRE TITANIO Y UN CÁTODO DE FIELTRO DE GRAFITO, A NIVEL DE LABORATORIO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Gilberto Carreño Aguilera, profesional de la Ingeniería Química
César Alfonso García Guerra, profesional de la Ingeniería Química

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


César Alfonso García Guerra
profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



Guatemala, 10 de agosto de 2021.
Ref. EIQ.151.2021

Aprobación del informe final del trabajo de graduación

Ingeniera
Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN (TESIS), DENOMINADO **OXIDACIÓN ANÓDICA ELECTROLÍTICA DEL COMPUESTO AROMÁTICO ACID RED 1, CONTENIDO DE TINTE DEL 60% (Amido Naftol Rojo G) UTILIZADO EN LA INDUSTRIA TEXTIL, EMPLEANDO UN ÁNODO DE DIÓXIDO DE RUTENIO SOBRE TITANIO Y UN CÁTODO DE FIELTRO DE GRAFITO, A NIVEL DE LABORATORIO** del(la) estudiante Lucia Jimena Baiza García, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Química.

“Id y Enseñad a Todos”

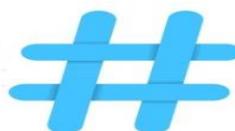

Ing. William G. Alvarez Vera, M.I.C. A.U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Cc. Archivo
WGAM/wgam



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939



**NO SALGAS
QUÉDATE EN
CASA**



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101 - 24189102

DTG. 342-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **OXIDACIÓN ANÓDICA ELECTROLÍTICA DEL COMPUESTO AROMÁTICO ACID RED 1, CONTENIDO DE TINTE DEL 60 % (Amido Naftol Rojo G) UTILIZADO EN LA INDUSTRIA TEXTIL, EMPLEANDO UN ÁNODO DE DIÓXIDO DE RUTENIO SOBRE TITANIO Y UN CÁTODO DE FIELTRO DE GRAFITO, A NIVEL DE LABORATORIO**, presentado por la estudiante universitaria: **Lucía Jimena Baiza García**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, agosto de 2021

AACE/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser la luz en mi camino y por permitirme culminar esta etapa de mi vida.
- Mis padres** Julio Baiza y Adela de Baiza, por ser mi inspiración y haberme guiado cada día de mi vida para poder desarrollarme como persona y profesional.
- Mis hermanas** Ana María y Gabriela Baiza, por ser el ejemplo de mi vida, por acompañarme con su apoyo y amor incondicional cuando más lo necesito.
- Mi sobrino** Lucca Vega, por ser mi luz y por llenar mis días de alegría.
- Mi familia** Rafael García, Ana María de García, Santos Vda. de Baiza, Ana Lorena García y María Mercedes García, por sus palabras de aliento, consejos y cariño

Mi segunda familia

Anabela del Cid, Axel González, Naty Cifuentes, Jorge Gamas, Andy Solares y Katia Arana, por la confianza, motivación y sobre todo por el cariño, significan parte esencial de mi vida

Mis amigos

Diego Mancilla, Christian Bendfeldt, Sofía Cap, Adolfo Salazar, María Mercedes Dardón, por su compañía, tiempo y apoyo a lo largo de este trayecto.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Mi <i>alma máter</i> , por el privilegio de formación académica de enseñanza superior.
Facultad de Ingeniería	Por ser mi base de formación profesional y por todos los conocimientos brindados a través de todos los catedráticos que formaron parte de este proceso.
Universidad de Guanajuato	A la Dirección de Apoyo a la Investigación y Postgrado de la Universidad.
Dr. Gilberto Carreño Dra. Luz Adriana Arias María Fernanda Murrieta	Por la oportunidad y el apoyo durante mi estancia y elaboración del trabajo de graduación.
Mi familia	Por estar presentes, por la confianza y por siempre tener una muestra de cariño y una palabra de aliento.
Mis amigos	Por compartir conmigo, por las experiencias vividas y sobre todo por el cariño. Gracias a ustedes, esto fue posible.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVII
HIPÓTESIS DE TRABAJO	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Justificación	3
1.2. Delimitación del problema	4
1.2.1. Definición	4
1.2.2. Delimitación	5
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Colorantes	7
2.1.1. Uso para el cual esté destinado.....	7
2.1.2. Clasificación tintórea (método de aplicación).....	8
2.1.2.1. Colorantes de Azufre	8
2.1.2.2. Colorantes de pigmentación	8
2.1.2.3. Colorantes directos.....	8
2.1.2.4. Colorantes dispersos	9
2.1.2.5. Colorantes reactivos	9
2.1.3. Clasificación Química	9

	2.1.3.1.	Colorantes Azo.....	11
		2.1.3.1.1. Acid Red 1.....	11
	2.1.3.2.	Colorantes antraquinónicos.....	12
	2.1.3.3.	Ftalocianinas	13
	2.1.3.4.	Colorantes de Azufre.....	13
	2.1.3.5.	Cianinas	13
2.2.		Contaminación de aguas residuales a nivel industrial.....	14
2.3.		Tratamiento de aguas residuales en industria textil	14
	2.3.1.	Métodos convencionales para el tratamiento de aguas residuales en industria textil	15
		2.3.1.1. Coagulación – Floculación	15
		2.3.1.2. Ozonización.....	16
		2.3.1.3. Tecnología de membranas.....	16
		2.3.1.4. Unidades de color en escala Platino – Cobalto.....	16
	2.3.2.	Métodos alternativos para el tratamiento de aguas residuales en la industria textil	16
		2.3.2.1. Electroquímica.....	17
		2.3.2.1.1. Sistemas electroquímicos	17
		2.3.2.1.2. Tipos de electrodos.....	18
		2.3.2.1.3. Electrólisis.....	19
		2.3.2.1.4. Electro descomposición	19
		2.3.2.1.5. Oxidación anódica.....	19
	2.3.2.2.	Procesos de oxidación avanzada.....	19
		2.3.2.2.1. Proceso tipo Fenton	20
	2.3.2.3.	Fotocatálisis	22

2.4.	Parámetros que influyen en un proceso de oxidación anódica.....	22
2.4.1.	Concentración del colorante	23
2.4.2.	Densidad de corriente.....	23
2.4.3.	Potencial de Hidrogeno	23
2.4.4.	Presencia de cloruros	24
2.4.5.	Velocidad de agitación.....	24
2.5.	Espectrofotometría	24
2.5.1.	Espectrofotometría UV – Visible.....	24
2.5.2.	Ley de Lambert - Beer	25
2.5.3.	Espectrofotómetro	25
2.5.4.	Absorbancia.....	26
2.5.5.	Espectro de absorción	27
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	29
3.1.	Variables.....	29
3.1.1.	Variables dependientes	29
3.1.2.	Variables independientes	29
3.2.	Delimitación del estudio.....	30
3.3.	Etapas de la investigación	31
3.4.	Recursos Humanos	32
3.5.	Localización del desarrollo de investigación.....	32
3.6.	Recursos Materiales	32
3.6.1.	Cristalería	32
3.6.2.	Equipo	33
3.6.3.	Reactivos	36
3.7.	Técnica cualitativa	37
3.8.	Recolección y ordenamiento de la información	38
3.9.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de los datos.....	41

3.10.	Análisis estadístico.....	41
3.10.1.	Media aritmética de la muestra	42
3.10.2.	Varianza de la muestra	42
3.10.3.	Desviación de la muestra	42
3.11.	Plan de análisis de datos	43
3.11.1.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variables.....	43
3.11.1.1.	Porcentaje de color removido del colorante Acid Red 1	43
3.11.1.2.	Unidad experimental a utilizar	43
3.11.2.	Programas utilizados para el análisis de datos	44
3.11.2.1.	Microsoft Word 2019	45
3.11.2.2.	Microsoft Excel 2019	45
3.11.2.3.	UV WinLab Explorer	45
4.	RESULTADOS.....	47
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	59
	CONCLUSIONES.....	65
	RECOMENDACIONES	67
	BIBLIOGRAFÍA.....	69
	APÉNDICE	73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Disodio;5-acetamido-4-hidroxi-3-fenildiazenilnaftaleno-2,7-disulfonato.....	4
2.	Clasificación química de los colorantes	10
3.	Clasificación química de los colorantes (continuación)	10
4.	Molécula Acid Red 1	12
5.	Sistema electroquímico.....	17
6.	Posible mecanismo de reacción para el proceso Fenton del colorante Acid Red 1.....	21
7.	Longitudes de onda para luz visible	25
8.	Mecanismo de trabajo del espectrofotómetro	26
9.	Radiación sobre la muestra.....	27
10.	Espectro de absorción	28
11.	Agitador con calefacción y pantalla digital PC-420D marca Corning™	34
12.	Espectrofotómetro UV/VIS marca PerkinElmer modelo Lambda 35	34
13.	Fuente de Alimentación conmutada marca BK Precision 1665.....	35
14.	pH/ORP/ISE metro marca Hanna Instruments.....	35
15.	Diagrama de condiciones para llevar a cabo la primera corrida del trabajo de investigación	38
16.	Diagrama de condiciones para llevar a cabo la segunda corrida del trabajo de investigación.	39
17.	Diagrama de condiciones para llevar a cabo la tercera corrida del trabajo de investigación	39

18.	Diagrama de condiciones para llevar a cabo la cuarta corrida del trabajo de investigación	40
19.	Diagrama de condiciones para llevar a cabo la quinta corrida del trabajo de investigación.	40
20.	Perspectiva caballera de la unidad experimental.....	44
21.	Perspectiva isométrica de la unidad experimental	44
22.	Porcentaje de colorante Acid Red 1 removido en función el tiempo para evaluar la influencia de cloruros en el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1	48
23.	Porcentaje de colorante Acid Red 1 removido en función el tiempo para analizar el efecto del pH en el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1.....	50
24.	Porcentaje de colorante Acid Red 1 removido en función el tiempo para determinar la densidad de corriente optima en el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1	52
25.	Porcentaje de colorante Acid Red 1 removido en función el tiempo para examinar la influencia de la velocidad de agitación (rpm) en el proceso de oxidación electrolítica del colorante textil Acid Red 1	54
26.	Porcentaje de colorante Acid Red 1 removido en función el tiempo para analizar la variación de la concentración del colorante durante el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1	56
27.	Porcentaje de colorante Acid Red 1 removido en función el tiempo para la reacción de Fenton del proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1.....	58

TABLAS

I.	Propiedades del colorante Acid Red 1	12
II.	Clasificación de las variables de trabajo	30
III.	Instrumentos de medición utilizado para llevar a cabo el trabajo de investigación	33
IV.	Equipo auxiliar utilizado para llevar a cabo el trabajo de investigación	33
V.	Especificaciones Cloruro de Sodio.....	36
VI.	Especificaciones del colorante Acid Red 1	36
VII.	Especificaciones del Sulfato de Sodio	37
VIII.	Especificaciones del Sulfato Ferroso	37
IX.	Modelo de medición de parámetros para proceso de obtención de resultados.....	41
X.	Espectro de absorción para evaluar la influencia de cloruros en el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1	47
XI.	Espectro de absorción para analizar el efecto del pH en el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1	49
XII.	Espectro de absorción para determinar la densidad de corriente optima en el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1	51
XIII.	Espectro de absorción para examinar la influencia de la velocidad de agitación (rpm) en el proceso de oxidación electrolítica del colorante textil Acid Red 1	53
XIV.	Espectro de absorción para analizar la variación de la concentración del colorante durante el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1	55

XV. Espectro de absorción para la reacción de Fenton del proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 157

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Absorbancia de la solución
A_T	Absorbancia en tiempo t de la solución
A₀	Absorbancia inicial de la solución
cm²	Centímetro cuadrado
pH	Concentración de iones de Hidrogeno
[AR]	Concentración del colorante Acid Red 1
i	Corriente eléctrica
j	Densidad de corriente eléctrica
MSDS	Hoja de datos de seguridad del material
ln	Logaritmo natural
λ	Longitud de onda
\bar{x}	Media de la muestra
μM	Micro moles
mA	Miliamperios
mm	Milímetro
mM	Milimolar
m	Minutos
% CR	Porcentaje de color removido
PAO	Procesos de oxidación avanzada
RPM	Revoluciones por minuto
Σ	Sumatoria
t	Tiempo
v	Velocidad de agitación

GLOSARIO

Absorbancia	Cantidad de luz absorbida de una solución.
Ánodo	Electrodo en el que tiene lugar la oxidación.
Cátodo	Electrodo en el cual tiene lugar la reducción.
Celda electrolítica	Consiste en dos electrodos sumergidos en una solución donde la reacción es propiciada por una fuente de corriente continua.
Cloro activo	Medida del poder oxidante expresada como cloro.
Colorante tipo azo	La función consiste en un enlace doble $-N=N$, unido a átomos de carbono con hibridación sp^2 .
Degradación	Reducción de un compuesto químico a uno menos complejo.
Electrolito	Disolución iónica que actúa como conductor eléctrico.
Electrólisis	Proceso de separación de sustancias mediante la aplicación de un potencial eléctrico entre dos electrodos.

Espectrofotómetro	Instrumento utilizado para determinar a qué longitud de onda la muestra absorbe luz e intensidad de absorción.
Oxidación anódica	Destrucción de compuestos orgánicos bajo la acción del ánodo de la celda electrolítica.
Oxidación avanzada	Proceso electrolítico en el que se produce una oxidación sobre la superficie de un ánodo con la introducción de una fuente de corriente eléctrica.
Reacción de Fenton	Proceso que consiste en añadir sales de hierro a una solución en presencia de H ₂ O ₂ en medio ácido para la formación de radicales OH.

RESUMEN

Se llevó a cabo el presente trabajo de investigación en el cual se planteó utilizar una técnica electrolítica de oxidación para la oxidación anódica de una solución que contenía el colorante Acid Red 1 a concentraciones diferentes, este propuso el uso de un ánodo de Dióxido de Rutenio sobre Titanio y un cátodo de fieltro de Grafito.

Para realizar dicho trabajo de investigación se evaluaron aspectos como el electrolito en solución, efectos del pH al que se trabaja, el aumentar y disminuir la concentración del colorante Acid Red 1, el modificar la velocidad de agitación de la solución a la hora de llevar a cabo el proceso y por último evaluar el efecto de realizar una reacción de Fenton.

El trabajo se llevó a la práctica en la Universidad de Guanajuato, Gto., México; División de Ingenierías, Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica. En dos sedes, los experimentos se realizaron en el laboratorio “La Perlita” ubicado en San Luisito S/N y el informe final en la Sede Belén ubicada en la avenida Juárez 77, Centro.

Las condiciones óptimas de degradación se alcanzaron trabajando con una solución de electrolitos mixta de 25 mM de Na_2SO_4 y 35 mM de NaCl, una concentración de colorante Acid Red 1 de 47,19 μM , densidad de corriente de 10 $\text{mA}\times\text{cm}^2$, velocidad de agitación de 100 RPM y un pH de 3 obteniéndose un porcentaje de decoloración del 99,14 %. Llevar a cabo el proceso de oxidación avanzada de Fenton, favoreció la velocidad de decoloración de la solución, alcanzando un 99,14 % de decoloración en 29 minutos, aproximadamente.

OBJETIVOS

General

Utilizar el método electrolítico de oxidación para degradar el colorante textil Acid Red 1 (Amido Naftol Rojo G.) empleando un ánodo de Dióxido de Rutenio sobre Titanio y un cátodo de fieltro de grafito, a nivel de laboratorio.

Específicos

1. Evaluar la influencia de iones cloruros en el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1 (*Amido Naftol Rojo G.*).
2. Analizar el efecto del pH en el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1 (*Amido Naftol Rojo G.*).
3. Determinar la densidad de corriente optima en el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1 (*Amido Naftol Rojo G.*).
4. Examinar la influencia de la velocidad de agitación (rpm) en el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1 (*Amido Naftol Rojo G.*).
5. Analizar la variación de la concentración del colorante durante el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1 (*Amido Naftol Rojo G.*).

6. Evaluar la reacción de Fenton para el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1 (*Amido Naftol Rojo G.*).

HIPÓTESIS

Hipótesis de trabajo:

Es posible realizar una oxidación anódica electrolítica, mediante el método de electrolisis, del colorante textil Acid Red 1 (Amido Naftol Rojo G.) empleando un ánodo de Dióxido de Rutenio sobre Titanio y un cátodo de fieltro de grafito, a nivel de laboratorio.

Hipótesis nula:

H₀₁: La concentración de iones cloruros no tiene efecto significativo en el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1.

H₀₂: Modificar el pH de la muestra no tiene un efecto significativo en el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1.

H₀₃: Alterar la velocidad de agitación de la muestra no tiene un efecto significativo durante el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1.

H₀₄: Variar la concentración del colorante no tiene un efecto significativo durante el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1.

H₀₅: Aplicar una reacción de Fenton no tiene un efecto significativo durante el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1.

Hipótesis alternativa:

H₁₁: La concentración de iones cloruros tiene efecto significativo en el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1.

H₁₂: Modificar el pH de la muestra tiene un efecto significativo en el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1.

H₁₃: Alterar la velocidad de agitación de la muestra tiene un efecto significativo durante el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1.

H₁₄: Variar la concentración del colorante tiene un efecto significativo durante el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1.

H₁₅: Aplicar una reacción de Fenton tiene un efecto significativo durante el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1.

INTRODUCCIÓN

La contaminación en efluentes es cada vez mayor, esto se debe al crecimiento poblacional y en su mayoría a la carencia de tratamientos de aguas residuales adecuados en las industrias. Debido a esta razón se asocian efectos perjudiciales tales como: la contaminación de los ecosistemas y efectos tóxicos en los seres vivos.

Este trabajo de investigación se enfocó en el parámetro de color en los efluentes finales de aguas residuales de las industrias textiles, que, en su mayoría, se encuentran por encima de los límites permisibles; estos colorantes no pueden ser degradados naturalmente o por métodos convencionales debido a la complejidad en su estructura molecular.

Se propuso utilizar la técnica de electrolisis oxido-reducción como método más eficiente para la oxidación anódica electrolítica de colorantes textiles ya que métodos convencionales, tales como: escala, platino-cobalto, coagulación-floculación, ozonización, tecnologías de membranas, adsorción, entre otras, no son efectivas.

Se investigó la factibilidad de usar un ánodo de Dióxido de Rutenio sobre Titanio y un cátodo de fieltro de Grafito para la oxidación anódica electrolítica de compuestos orgánicos aromáticos siendo en este caso el colorante Acid Red 1 (*Amido Naftol Rojo G*).

La razón por la cual se trabajó con el colorante Acid Red 1 se debe a que se ha encontrado presente en los efluentes de aguas residuales de las industrias textiles y es un compuesto complejo de degradar debido a su estructura molecular.

Se evaluaron efectos del potencial de hidrogeno de la solución, electrolito en solución, concentración del colorante Acid Red 1, densidad de corriente brindada por la fuente de poder externa, velocidad de agitación de la solución y reacción de Fenton; de esta manera se encontraron las condiciones óptimas de trabajo.

1. ANTECEDENTES

Debido a que la contaminación en las aguas residuales de las industrias textiles cada vez es mayor, las normas para las descargas de los efluentes se controlan de manera más estricta. A causa de esto se han realizado varias investigaciones con el fin de alcanzar un proceso más eficiente y completo debido a que por la estructura de los colorantes, estos no se pueden desechar por medio de un tratamiento de agua convencional. El método a tratar es la electroquímica, existen dos aplicaciones principales las cuales consisten en; la primera llamada *conversión electroquímica* se basa en transformar los orgánicos no bio-compatibles en orgánicos bio-compatibles, previo a un tratamiento biológico. Idealmente se debe de utilizar un electrodo con una alta actividad electroquímica para que este sea capaz de abrir el anillo aromático del colorante. El segundo método es la *combustión electroquímica* en la cual los compuestos orgánicos son oxidados completamente a dióxido de carbono, en este caso, se debe de usar un electrodo con una alta actividad electrocatalítica.

En 1973 se publicó el artículo “Electrocatalisis en la conversión/combustión electroquímica de contaminantes orgánicos para el tratamiento de aguas residuales” por Christos Comninellis en el Instituto Federal Suizo de Tecnología de Ingeniería Química, Suiza en el cual se presenta un mecanismo simplificado para la oxidación o combustión selectiva electroquímica de compuestos orgánicos con desprendimiento simultáneo de oxígeno.

En el 2009 se publicó el artículo “Empleo del reactivo de Fenton para la degradación del colorante Tartrazina” por Joan Amir Arroyave Rojas, Luis Fernando Garcés Giraldo y Julieta Mejía Trujillo para la Corporación Universitaria

Lasallista en Antioquia, Colombia en el cual buscan implementar una tecnología de oxidación avanzada para la remoción del colorante Trazanina.

Lograron la remoción y degradación del colorante empleando diferentes combinaciones de oxidación del reactivo de Fenton, sin embargo, el mejor porcentaje de remoción fue de 99,3 % mediante la combinación de 25 mg/L de Fe^{3+} y 0,4 % v/v del agente oxidante peróxido de hidrógeno.

En el 2014 se publicó un artículo con el título “Descontaminación de aguas residuales que contienen colorantes orgánicos sintéticos por métodos electroquímicos” por Enric Brillas y Carlos A. Martinez-Huitle en la Facultad de Química de la Universidad Martí i Franquès de Barcelona, España y en el Instituto de Química de la Universidad Federal de Río Grande del Norte, Brasil, respectivamente. En este se describen métodos electro-Fenton y foto-asistidos de electroquímica como la foto electrocatálisis y la foto electro-Fenton, que destruyen los colorantes por $\bullet\text{OH}$ heterogéneos y/u $\bullet\text{OH}$ homogéneos producidos en el volumen de la solución.

En ese mismo año se publicó el artículo Degradación del colorante rojo ácido 1 por oxidación anódica y procesos electroquímicos indirectos basados en la química de reacción de Fenton. Relación entre decoloración, mineralización y productos. Por Xavier Florenza, Aline Maria Sales Solano, Francesc Centellas en la Universidad de Barcelona, España en el cual se ha corroborado la eficacia de los procesos de oxidación avanzada electroquímica que utilizan un ánodo de Pt o BDD y un cátodo de difusión de aire para degradar el colorante aromático Acid Red 1 en términos de eficiencia de decoloración y tasa de mineralización a pH 3.

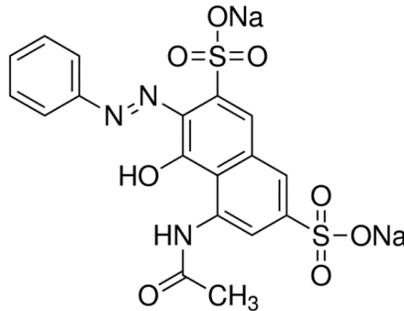
En junio del 2015 se publicó un artículo con el título Proceso electroquímico simple y compuesto y reactores para la reducción de contaminantes orgánicos del agua: un reporte crítico. por y Carlos A. Martínez-Huitl en el Instituto de Química de la Universidad Federal de Rio Grande del Norte, Brasil. Este artículo se centra en la oxidación electroquímica directa, la oxidación electroquímica indirecta mediada por cloro activo electro generado y el acoplamiento entre los procesos anódico y catódico.

En enero del 2017 se publicó un artículo con el título Evidencia de una reacción similar a la de Fenton con cloro activo durante la oxidación electrocatalítica del colorante *Acid Yellow 36 azo dye* con ánodo de óxido Ir-Sn-Sb en presencia de iones de hierro por Zaira G. Aguilar en el departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica de la Universidad de Guanajuato, México. Este artículo discuten la importancia de la formación de cloro activo al llevar a cabo un proceso de oxidación avanzada.

1.1. Justificación

La problemática de las aguas residuales se debe, en su mayoría, al crecimiento poblacional e industrial. Parte de la contaminación aportada por las industrias son los colorantes textiles. Anteriormente se ha estudiado que la eliminación de estos colorantes es muy compleja debido a la estructura de los mismos. En este trabajo se propone la eliminación de colorantes textiles por medio del método de electrólisis oxido-reducción para la oxidación anódica electrolítica del colorante Acid Red 1 empleando un ánodo de Dióxido de Rutenio sobre Titanio y un cátodo de fieltro de grafito.

Figura 1. **Disodio;5-acetamido-4-hidroxi-3-fenildiazenilnaftaleno-2,7-disulfonato**



Fuente: Merck. *Molécula Amido Naphthol Red G.*

www.sigmaaldrich.com/catalog/substance/acidred1. Consulta: marzo de 2020.

1.2. Delimitación del problema

El trabajo de graduación radica en el tratamiento de aguas residuales de industrias textiles por métodos de oxidación avanzada.

1.2.1. Definición

La contaminación en los efluentes de agua se debe en su mayoría, al crecimiento poblacional y a la contaminación industrial. La contaminación de aguas residuales en las industrias se debe a la carencia de tratamientos previos al desecho de las mismas, a causa de esto se han implementado leyes estrictas que vigilan el proceso de desecho de aguas residuales.

El presente trabajo propone un método de tratamiento de agua, a nivel de laboratorio, para la industria textil, puesto que el tratamiento de estas aguas es muy complejo debido a las estructuras moleculares de los colorantes utilizados

en sus procesos. Se plantea un proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1 empleando un ánodo de dióxido de rutenio y un cátodo de fieltro de grafito.

1.2.2. Delimitación

Se planteó un proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1 empleando un ánodo de dióxido de rutenio y un cátodo de fieltro de grafito. Se analizó el tipo de electrolito con el que se trabajó, condiciones fisicoquímicas tales como el pH y concentración del colorante. Se evaluó la influencia de la velocidad de agitación y densidad de corriente con la que se trabaja. Por último, se analizará el efecto de una reacción de Fenton en el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Colorantes

“Para que una sustancia sea considerada como un colorante, además de poseer color, debe de ser capaz de transferirlo al medio al cual se aplica.”¹

Los colorantes se pueden clasificar considerando los siguientes criterios:

2.1.1. Uso para el cual esté destinado

Los colorantes se agrupan según el uso para el cual estén destinados, siendo estos:

- Abrillantadores y fluorescentes
- Alimentos, drogas y cosméticos
- Cerámicos y vidrios
- Fotografía y sensibilizadores fotográficos
- Pinturas y barnices
- Plásticos
- Textiles y otras fibras
- Tintas y tipografías

¹ MARCANO, Deanna. *Introducción a la Química de los Colorantes*. p. 30.

2.1.2. Clasificación tintórea (método de aplicación)

Utilizando el criterio del *Colour Index*, Catálogo editado por la Sociedad de Tintoreros y Coloristas de Inglaterra y la Asociación Americana de Químicos Textiles y Coloristas, el cual es aceptado internacionalmente, la clasificación tintórea los colorantes pueden ser:

2.1.2.1. Colorantes de Azufre

Colorantes poliméricos insolubles en agua que contienen azufre enlazado a la cadena o como integrante del cromóforo.

2.1.2.2. Colorantes de pigmentación

Sustancias orgánicas o inorgánicas insolubles, generalmente policondensados, se les denomina de esta manera debido a que no presentan afinidad con las fibras y es necesario utilizar un aglutinante.

2.1.2.3. Colorantes directos

Son aquellos que contienen grupos polares que se adhieren directamente a las fibras por interacciones electrostáticas. Estos pueden ser:

- Colorantes ácidos

Colorantes aniónicos solubles en agua que contienen grupos ácidos, se utilizan para teñir grupos básicos.

- Colorantes básicos

Colorantes catiónicos solubles en agua que contienen grupos básicos, tienen afinidad para teñir grupos ácidos.

- Colorantes sustantivos

Colorantes con estructuras alargadas que se adaptan paralelamente a las fibras celulósicas y se mantienen unidos por medio de puentes de hidrogeno. Estos colorantes también son denominados colorantes directos.

2.1.2.4. Colorantes dispersos

Son colorantes solubles en solventes orgánicos o en fibras sintéticas no polares. Estos pueden ser de alta, media o baja energía. Siendo los de alta energía, resistentes a la sublimación y requieren de altas temperaturas para su aplicación.

2.1.2.5. Colorantes reactivos

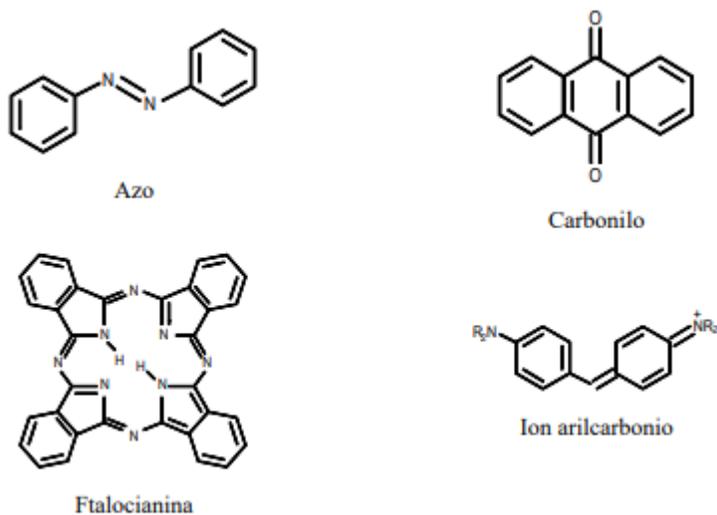
Colorantes que contienen en su molécula un grupo reactivo que se une a la fibra mediante enlaces covalentes formando éteres o ésteres.

2.1.3. Clasificación Química

El color es determinado por la conjugación en la estructura de la molécula de un colorante. Para esta clasificación es necesario tener en cuenta el grupo cromofórico. Actualmente existen 29 categorías de acuerdo al cromóforo.

Según el *Colour Index*, las clasificaciones químicas de mayor importancia son:

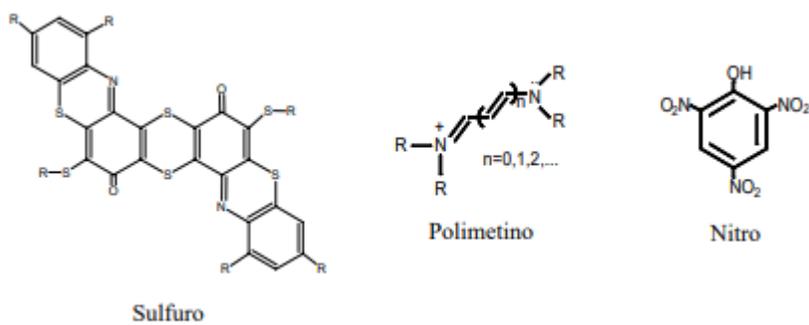
Figura 2. **Clasificación química de los colorantes**



Fuente: Colour Index. *Clasificación de los colorantes*.

www.sigmaaldrich.com/catalog/substance/acidred1 Consulta: marzo 2020.

Figura 3. **Clasificación química de los colorantes (continuación)**



Fuente: Colour Index. *Clasificación de los colorantes*.

www.sigmaaldrich.com/catalog/substance/acidred1 Consulta: marzo 2020.

2.1.3.1. Colorantes Azo

Se caracterizan por tener un grupo funcional azo, consiste en un enlace doble $-N=N-$, conjugado con anillos aromáticos por ambos extremos. Generalmente el grupo azo se une a dos anillos aromáticos.

“En cuanto a sus propiedades de color, los tintes azo aportan un rango de matices prácticamente completo y una alta intensidad de color. Además, presentan buenas propiedades técnicas: solidez a la luz, al calor, al agua y a otros disolventes.”². A este grupo pertenece la mitad de los colorantes sintéticos.

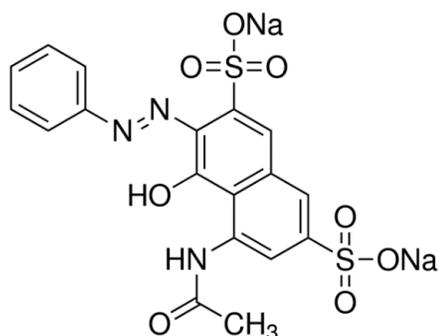
Los tintes azo constituyen la familia más importante entre los colorantes industriales.

2.1.3.1.1. Acid Red 1

El colorante que se utilizará para realizar el estudio es el Amido Naftol Rojo G – Contenido de tinte del 60 %.

² Asociación americana de químicos y coloristas textiles. *Características de los colorantes tipo azo*. <https://www.aatcc.org/>. Consulta: marzo 2020.

Figura 4. **Molécula Acid Red 1**



Fuente: Merck. *Molécula del colorante Acid Red 1.*

www.sigmaaldrich.com/catalog/substance/acidred1. Consulta: marzo de 2020.

Tabla I. **Propiedades del colorante Acid Red 1**

Nomenclatura IUPAC	2,7-disulfonato;5-acetamido-4-hidroxi-3 fenildiazenilnaftaleno-Disódico
Fórmula del compuesto	$C_{18}H_{13}N_3Na_2O_8S_2$
Peso molecular	509.42 g/mol
Composición	Contenido de tinte del 60 %
Absorbancia Máxima	$\lambda_{max} = 506 \text{ nm}$
Marca	Sigma-Aldrich

Fuente: elaboración propia.

2.1.3.2. **Colorantes antraquinónicos**

La característica principal de estos colorantes es la presencia de al menos, un grupo cetónico asociado a un sistema conjugado, simultáneamente presenta sustituyentes en conjugación con grupos carbonilo.

2.1.3.3. Ftalocianinas

Colorante constituido por cuatro radicales libres iso-indol, unidos a un ion metálico. Considerado como un análogo sintético de la familia de las porfirinas. Es el segundo colorante más importante debido a que está destinado para tintas, pinturas acrílicas y plásticos.

2.1.3.4. Colorantes de Azufre

Sustancias poliméricas, que contienen azufre en su estructura. Este átomo se enlaza en tres tipos de estructuras siendo estas, tiazoles, tiazonas y tiantrenos. Se caracterizan por ser altamente coloreados e insolubles en agua, amorfos y en su mayoría, coloidales.

2.1.3.5. Cianinas

Estos colorantes contienen la unidad estructural vinilo, $\text{CH}=\text{CH}$. Pertenecen a la categoría de polimetino y metino. Colorantes de gran importancia como sensibilizadores fotográficos.

Existen tres grupos cromóforos principales:

- Cianina - grupo imidinio
- Oxonol - grupo carbonilo-ion
- Merocianina- grupo amida dipolar

2.2. Contaminación de aguas residuales a nivel industrial

Actualmente en Guatemala el Reglamento de Descargas de Aguas Residuales a Cuerpos Receptores, comparados con países como México y Costa Rica, es ineficaz. Las razones se deben a que no se distinguen el tipo de industria, la periodicidad de muestreo es menor, la medición de color en el agua no es la adecuada, no se considera la medición de demanda de oxígeno y no se considera la medición de parásitos presentes en el agua.

El estudio se enfoca en el parámetro del color en los efluentes de aguas residuales, aquella que proviene en su mayoría industrias textiles. En el 2005 se establecía como límite máximo permisible 40 unidades de color en la escala platino-cobalto, sin establecer etapas de cumplimiento, es decir que debía de cumplirse en un plazo de seis años.

En cambio, en el reglamento del año 2006 el límite máximo permisible en la última etapa de cada artículo regulatorio del parámetro de color, es de 500 unidades.

Además, se debe considerar que el parámetro de color medido en escala de platino-cobalto no es el método adecuado para agua residual, en especial para la del tipo industrial; se debe de utilizar métodos más precisos como el espectrofotométrico posterior a filtración de la muestra para obtener el color real.

2.3. Tratamiento de aguas residuales en industria textil

Para poder producir, la industria textil necesita una gran cantidad de agua, debido a esta razón, las aguas resultantes de estos procesos están altamente

contaminadas por la presencia de colorantes, sales inorgánicas, surfactantes, entre otros compuestos químicos.

La descarga de estas aguas residuales a cuerpos de agua, presenta un riesgo para la calidad de los recursos hídricos, por dicha razón se les debe de dar un tratamiento adecuado.

2.3.1. Métodos convencionales para el tratamiento de aguas residuales en industria textil

Debido al alto impacto ambiental que tiene la falta de tratamiento adecuado para las aguas residuales, la medición de color se ha ido convirtiendo en un parámetro delicado, por lo mismo se han enfocado los estudios a metodologías que entreguen resultados confiables.

Los métodos convencionales para el tratamiento de aguas residuales en industrias textiles son los siguientes:

2.3.1.1. Coagulación – Floculación

Método de eliminación de colorantes por medio de decantación, este consiste en agregar un agente floculante a la solución y así permitir la separación del mismo. Este método es eficiente para la remoción de coloides y sólidos suspendidos.

2.3.1.2. Ozonización

Proceso que consta de agrega ozono a la solución que contiene el colorante, el ozono tiene una elevada capacidad oxidante que provoca la destrucción de moléculas del colorante.

2.3.1.3. Tecnología de membranas

Para llevar a cabo este método se hace uso de membranas las cuales permiten la separación de las moléculas del colorante debido a que el tamaño es mayor al del poro de la membrana seleccionada.

2.3.1.4. Unidades de color en escala Platino – Cobalto

Escala estandarizada que se utiliza para evaluar la cantidad de color contenida en una muestra de agua, el color se determina por comparación visual de la muestra con soluciones coloreadas de platino-cobalto de concentraciones conocidas.

2.3.2. Métodos alternativos para el tratamiento de aguas residuales en la industria textil

Los métodos convencionales son insuficientes cuando se habla de la industria textil por lo que se ha enfocado el estudio en los métodos alternativos, siendo estos, electroquímica, procesos avanzados de oxidación y ultrasonido.

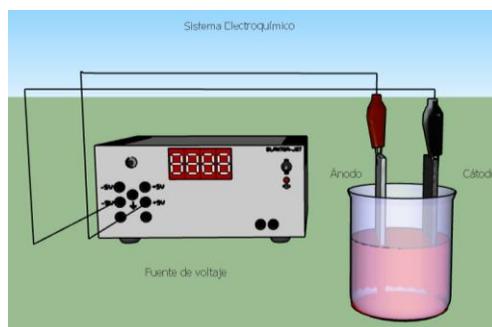
2.3.2.1. Electroquímica

Estudio de una reacción química que produce efectos eléctricos, generados espontáneamente o por medio de una fuente externa. Se basa en el estudio de la transferencia de cargas interfaciales, es decir, el paso de los electrones a través de la zona interfacial.

2.3.2.1.1. Sistemas electroquímicos

“Se define un sistema electroquímico como un sistema heterogéneo en el que hay una diferencia de potencial eléctrico entre dos o más fases.”³ El estudio de este, se centra en un sistema electroquímico en el cual su fase es un conductor eléctrico, trabajándose con una disolución de líquido que contiene iones. Una parte fundamental de un sistema electroquímico son los electrodos, estos electrodos estrictamente se deben de encontrar sumergidos en una disolución electrolítica, sustancia que, en solución acuosa, conduce corriente eléctrica.

Figura 5. Sistema electroquímico



Fuente: elaboración propia, empleando Sketchup.

³ LEVINE, Ira N. *Fisicoquímica*. p. 453.

2.3.2.1.2. Tipos de electrodos

- Ánodo – electrodo positivo

Se define el ánodo como el electrodo en el que tiene lugar la oxidación, utilizándose para este estudio un ánodo de Dióxido de Rutenio sobre Titanio.

- Cátodo – electrodo negativo

Se define el cátodo como el electrodo en el cual tiene lugar la reducción, utilizándose para este estudio un cátodo de Filtro de Grafito.

- Electroodos DSA

Por sus siglas en inglés, ánodos dimensionalmente estables. Se trata de un material electro-catalizador recubierto capaz de transportar altas densidades de corrientes sin cambiar su tamaño, degradarse o corroerse.

- Electroodos redox

“Reacción cuya reacción media de oxidación – reducción está entre dos especies presentes en la misma solución. El metal que se sumerge en la solución, sirve solo para suministrar o aceptar electrones.”⁴

⁴ LEVINE, Ira N. *Fisicoquímica*. p. 468.

2.3.2.1.3. Electrólisis

Proceso mediante el cual se obtiene la disociación de un electrolito, a partir de la alimentación de una corriente eléctrica continua. Esta corriente produce una reacción de oxidación y reducción en ambos electrodos.

2.3.2.1.4. Electro-descomposición

Reacción que implica la disminución del estado de oxidación y ganancia de electrones de un compuesto metálico. La oxidación es una pérdida de electrones mientras que la reducción es una ganancia de electrones.

2.3.2.1.5. Oxidación anódica

“Método basado en la destrucción de compuestos orgánicos bajo la acción del ánodo de la celda electrolítica.”⁵

2.3.2.2. Procesos de oxidación avanzada

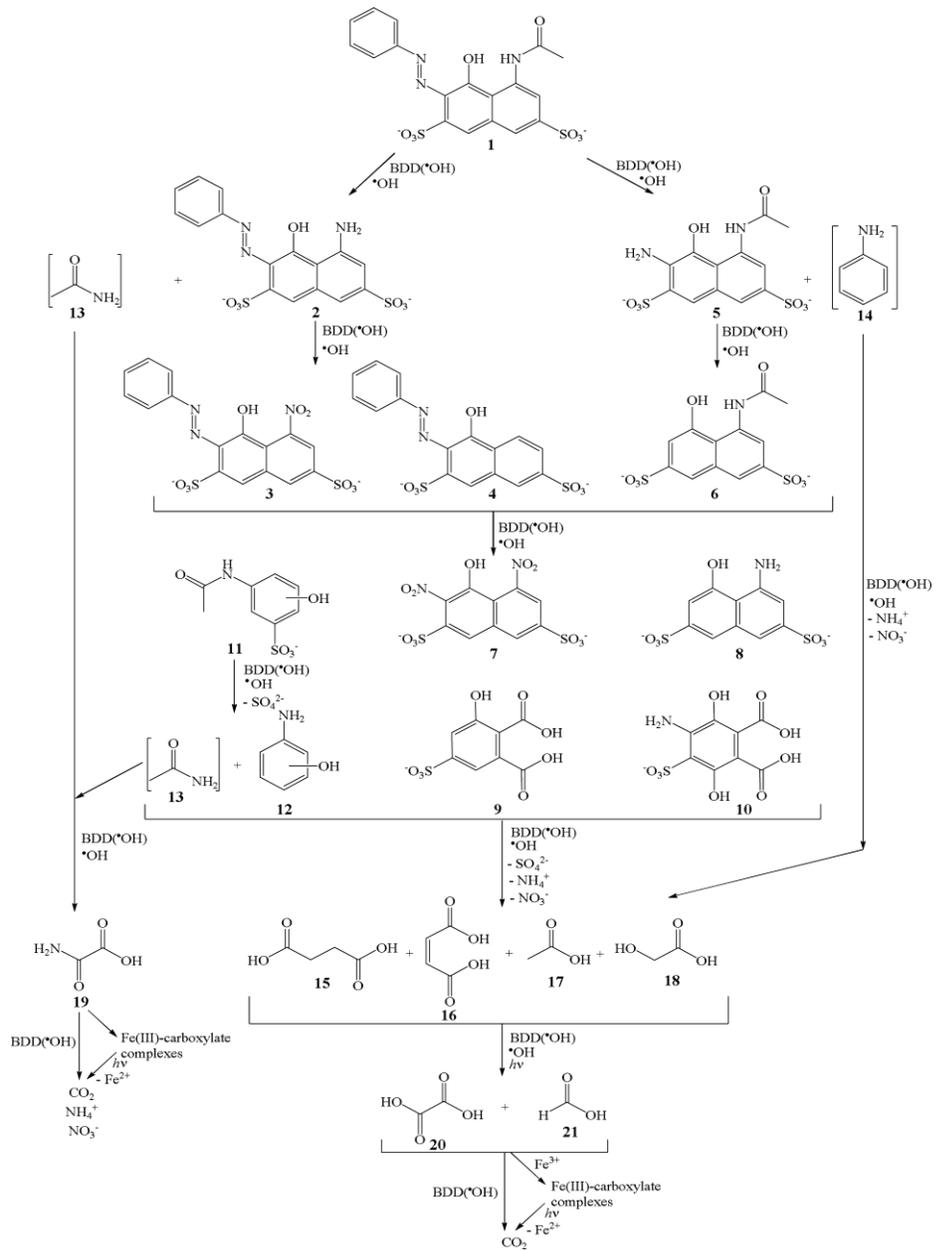
La oxidación avanzada consiste en un proceso fisicoquímico capaz de producir un cambio en la estructura química de un contaminante. Principalmente involucra la generación del radical hidroxilo. Los subproductos de esta reacción son solamente agua y dióxido de carbono debido a que la generación de radicales se produce a partir de agua y oxígeno. La principal ventaja que estos procesos ofrecen es el uso en cadena de los mismos, para obtener mejores resultados. Se consideran como una alternativa de bajo costo y de alta capacidad de degradación.

⁵ ScienceDirect. *Electrocatalysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants for wastewater treatment*. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(94\)85175-1](https://doi.org/10.1016/0013-4686(94)85175-1). Consulta: marzo de 2020.

2.3.2.2.1. Proceso tipo Fenton

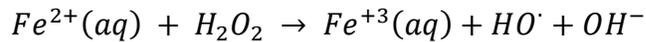
Proceso que consiste en mezclar la solución que contiene el colorante con una combinación de peróxido de hidrógeno y Fe^{+2} o Fe^{+3} , que actúa como catalizador. Esta reacción se debe de llevar a cabo en condiciones ácidas. El agente oxidante de dicha reacción es el radical hidroxilo ($\text{OH}\cdot$). Este radical es capaz de oxidar compuestos orgánicos libres o por abstracción de hidrogeno. Llevar a cabo este proceso, provoca un aumento en la velocidad de decoloración de la solución.

Figura 6. **Posible mecanismo de reacción para el proceso Fenton del colorante Acid Red 1**



Fuente: FLORENZANA, Xavier. *Degradation of the azo dye Acid Red 1 by anodic oxidation and indirect electrochemical processes based on Fenton's reaction chemistry*. p. 15.

La reacción que se lleva a cabo, usualmente es la siguiente:



En la cual, Fe^{2+} es oxidado a Fe^{3+} y H_2O_2 es reducida al ion hidróxido y al radical hidroxilo.

Esta reacción se debe de trabajar, preferiblemente a un pH 3, pues de otra manera se formarán otras especies del hierro no deseadas y se tendrá el riesgo que se forme un precipitado de hidróxido de hierro. Se le denomina reactivo de Fenton a la combinación de H_2O_2 y sales de hierro.

2.3.2.3. Fotocatálisis

“Reacción catalizada por Dióxido de Titanio, que involucra la absorción de luz. El catalizador y la luz, son necesarios para obtener la aceleración de la reacción química.”⁶ Es así, como se define la fotocatálisis como, la aceleración de una fotorreacción mediante un catalizador.

2.4. Parámetros que influyen en un proceso de oxidación anódica

El tema de estudio se enfoca en procesos de oxidación avanzada, en este caso utilizada para el tratamiento de aguas residuales. Los principales parámetros que influyen en este proceso se detallan a continuación.

⁶ GARCÉS, Luis. *La fotocatálisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales*. p. 86.

2.4.1. Concentración del colorante

El objetivo de estudio de la variación en la concentración del colorante Acid Red 1 en la muestra se debe a que se busca obtener mayores porcentajes de eliminación de color y se necesita saber la influencia que este tiene a la hora de trabajarse a diferentes concentraciones.

2.4.2. Densidad de corriente

Es una magnitud vectorial con la misma dirección de partículas cargadas, que se define como la cantidad de carga que se transmite por unidad de tiempo y por unidad de sección transversal. “Este parámetro, es de suma importancia para el estudio debido a que la intensidad del mismo, definirá el tiempo de degradación de la muestra pues determina la producción de cloro activo mediante la oxidación anódica de las especies Cl^- .”⁷

2.4.3. Potencial de Hidrogeno

Unidad de medida que se utiliza para conocer el nivel de acidez o alcalinidad de una muestra. “El potencial de Hidrogeno es uno de los factores significativos para los procesos Fenton; el hierro tiende a formar complejos insolubles con el agua a pH por encima de 4, lo que reduce la cantidad de hierro disponible como catalizador, disminuyendo la eficiencia del proceso.”⁸

⁷ MURRIETA, María Fernanda. *Decoloración y mineralización del colorante textil Acid Red 1 mediante un proceso tipo fotoelectro-Fenton solar empelando ácido hipocloroso producido electrocatalíticamente*. p. 9.

⁸ GILPAVAS, Edison. *Tratamiento de aguas residuales de la industria textil mediante coagulación química acoplada a procesos Fenton intensificados con ultrasonido de baja frecuencia*. p. 15.

2.4.4. Presencia de cloruros

El ion cloruro es un ion inorgánico, los compuestos están constituidos por átomos de cloro y elementos poco electronegativos o elementos metálicos, que forman sales básicas. Estos se encuentran en las aguas residuales de la industria textil.

2.4.5. Velocidad de agitación

Este parámetro es de suma importancia para llevar a cabo un proceso de degradación pues se encarga de la optimización de mezclado de la muestra, evitando la sedimentación de cualquier partícula y así alcanzar la homogenización de la misma.

2.5. Espectrofotometría

Técnica analítica que emplea la interacción de la radiación electromagnética con la materia, utilizada para conocer la concentración de un compuesto en solución. Estudia la absorción y emisión de la radiación electromagnética de la muestra. La concentración depende linealmente de la cantidad de luz absorbida.

2.5.1. Espectrofotometría UV – Visible

Enfoca su estudio en la absorción de la radiación ultravioleta- visible de una molécula. La longitud de onda que absorbe una muestra, determina el color.

Figura 7. **Longitudes de onda para luz visible**



Fuente: CHANG, Raymond. *Química*. p. 278.

2.5.2. **Ley de Lambert – Beer**

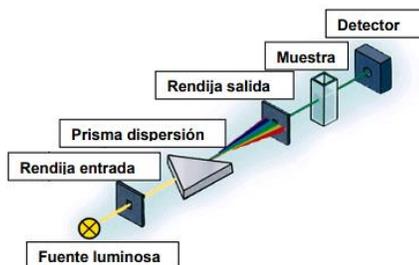
Teoría que respalda un medio homogéneo en el que la densidad molecular es constante, comprobando que la absorbancia es linealmente proporcional a la concentración. Es decir, depende de la naturaleza de la muestra, la cantidad de moléculas sobre las que incide la radiación y la frecuencia de la radiación utilizada.

2.5.3. **Espectrofotómetro**

Cantidad de luz absorbida de una solución, dicha cantidad depende de la luz incidente capaz de atravesar la muestra. La cantidad de luz absorbida depende de manera lineal con la concentración de la muestra.

Los espectrofotómetros constan de una lámpara de tungsteno que actúa como fuente de energía radiante, un monocromador que se utiliza para la selección de radiación de una longitud de onda, un recipiente transparente de cuarzo, para contener la muestra, un detector de luz y amplificador de señales luminosa y un sistema para la lectura de las muestras.

Figura 8. **Mecanismo de trabajo del espectrofotómetro**



Fuente: DIAZ, Abril. *Espectrofotometría*. p. 5.

2.5.4. **Absorbancia**

Cantidad de luz absorbida de una solución, dicha cantidad depende de la luz incidente capaz de atravesar la muestra y de la concentración de la misma.

Un rayo de luz incide perpendicularmente sobre la muestra, absorbiendo una parte de la radiación y el resto la deja pasar, de manera que se cumple lo siguiente:

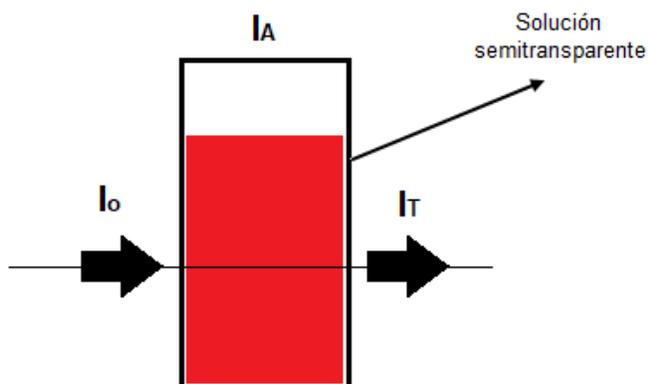
Ecuación 1. Radiación sobre la muestra

$$I_O = I_A + I_T$$

Donde:

- $I_O =$ Radiación incidente
- $I_A =$ Radiación absorbida
- $I_T =$ Radiación transmitida

Figura 9. **Radiación sobre la muestra**

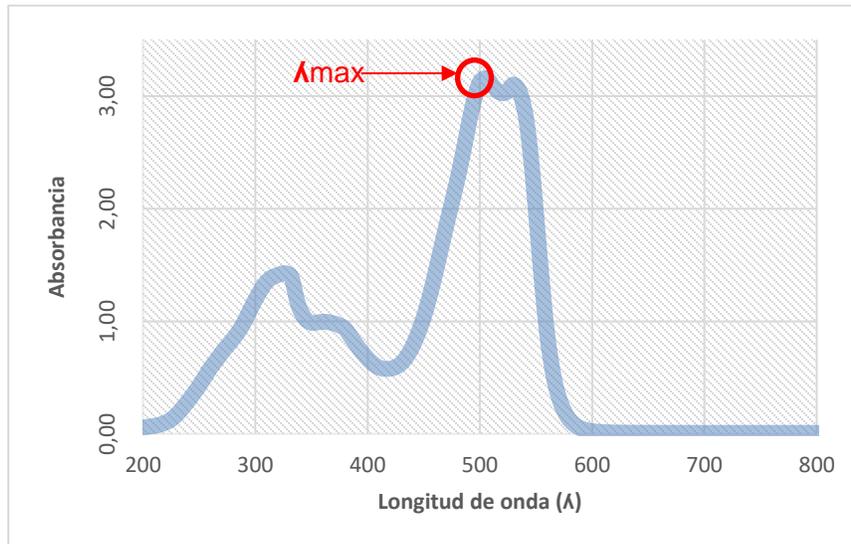


Fuente: elaboración propia.

2.5.5. **Espectro de absorción**

Representación gráfica de la absorbancia de una solución en función de la longitud de onda. Se le llama espectro a la región que se forma cuando la luz blanca pasa a través de un prisma descomponiéndose en longitudes de onda o colores que lo integran. Esta representación gráfica da valores de absorbancia a diferentes longitudes de onda. Dependiendo de la naturaleza del compuesto se obtiene una longitud de onda máxima (λ_{max}), la cual es utilizada para obtener los resultados. Este depende directamente de la estructura química del elemento.

Figura 10. **Espectro de absorción**



Fuente: elaboración propia.

Para el análisis espectrofotométrico se utiliza la máxima absorbancia obtenido del espectro, pues este da la longitud de onda que proporciona la mayor sensibilidad.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

En esta sección se describen las variables dependientes e independientes del estudio.

3.1.1. Variables dependientes

- Absorbancia
- Porcentaje de decoloración
- Tiempo de decoloración

3.1.2. Variables independientes

- Concentración del colorante aromático Acid Red 1
- Densidad de corriente
- Potencial de hidrogeno
- Sustancia electrolítica
- Temperatura
- Tiempo de decoloración
- Velocidad de agitación

Se presenta la siguiente tabla en la cual se exponen las variables con el rango de trabajo y su dimensional. Se define el parámetro como constante o variable y se limita como variable dependiente o independiente.

Tabla II. Clasificación de las variables de trabajo

Variable	Rango de trabajo	Dimensional	Parámetro constante	Parámetro variable	Variable independiente	Variable dependiente
Sustancia electrolítica	En presencia o ausencia de cloruros		•	•		
Potencial de Hidrogeno	3 a 8	adimensional		•	•	
Concentración del colorante aromático <i>Acid Red 1</i>	47.19 a 259.30	µM		•	•	
Densidad de Corriente	5 a 10	mA/cm ²		•	•	
Velocidad de Agitación	60 a 100	rpm		•	•	
Tiempo de decoloración	0 a 120	minutos		•		•
Porcentaje de decoloración	0 a 100	%		•		•
Absorbancia	0 a 3.5	adimensional		•		•
Longitud de onda	506	nm	•		•	
Temperatura	25	°C	•		•	

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del estudio

El trabajo de investigación es de carácter cualitativo enfocado en el área de Físicoquímica, el mismo se limita a llevar a realizar la oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red 1 por medio de una reacción oxidación-reducción empleando un ánodo de Dióxido de Rutenio sobre Titanio y un cátodo de fieltro de Grafito para el tratamiento de aguas residuales en la industria textil, realizado a nivel de laboratorio.

3.3. Etapas de la investigación

- **Primera etapa**
La primera etapa de investigación es establecer el parámetro del electrolito en solución para analizar los posibles efectos de utilizar sulfato de sodio o cloruro de sodio al momento de realizar la oxidación anódica.
- **Segunda etapa**
La segunda etapa de investigación es utilizar tres diferentes concentraciones de colorante Acid Red 1 y de esta manera analizar el efecto que esta implica al momento de realizar la oxidación anódica.
- **Tercera etapa**
La tercera etapa de investigación es modificar el pH de la solución estándar, trabajando en un medio ácido tanto como básico para analizar el efecto que este implica al momento de realizar la oxidación anódica.
- **Cuarta etapa**
La cuarta etapa de investigación es trabajar a cinco velocidades de agitación de la solución estándar y de esta manera analizar el efecto que este aporta al momento de realizar la oxidación anódica.
- **Quinta etapa**
La quinta etapa se llevará a cabo utilizando cinco diferentes densidades de corrientes para conocer el efecto que se tiene al momento de realizar la oxidación anódica.

- Sexta etapa
Por último, la sexta etapa consiste en llevar a cabo una reacción de Fenton para luego ser comparada con una solución con condición estándar.

3.4. Recursos Humanos

- Investigador: Br. Lucía Jimena Baiza García
- Asesor: Ing. Cesar Alfonso García Guerra
- Co Asesor: Dr. Gilberto Carreño Aguilera

3.5. Localización del desarrollo de investigación

El estudio y obtención de resultados se realizó en el laboratorio “La Perlita” de la división de ingenierías de la Universidad de Guanajuato, Gto., México. C.P. 36000.

3.6. Recursos Materiales

Para llevar a la práctica el trabajo de graduación se utilizó el equipo de laboratorio que se detalla a continuación:

3.6.1. Cristalería

Objetos de vidrio utilizados para la realización de la práctica.

Tabla III. **Instrumentos de medición**

Instrumentos de Medición	Marca	Volumen	Cantidad
Espectrofotómetro UV/VIS	PerkinElmer	-	1
pH/ORP/ISE metro	Hanna Ins.	-	1
Fuente de Alimentación	BK Precisión	-	1
Balón Aforado	Pyrex	10 mL	1
	Pyrex	25 mL	1
	Pyrex	100 mL	4
Micro pipeta mecánica	-	1 mL	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Equipo auxiliar utilizado para llevar a cabo el trabajo de investigación**

Equipo Auxiliar	Marca	Volumen	Cantidad
Beaker	Pyrex	50 mL	1
	Pyrex	100 mL	4
	Pyrex	1000 mL	2
Matraz de Erlenmeyer	Pyrex	500 mL	2
Vidrio de Reloj	Pyrex	-	1
Agitador con calefacción	Corning	-	1
Base de Soporte de Acero	R&L E.™	-	1
Pinzas de Soporte de Aluminio	R&L E.™	-	1

Fuente: elaboración propia.

3.6.2. **Equipo**

- Agitador con calefacción con pantalla digital PC-420D

Para modificar la velocidad de agitación de las soluciones se utilizó un agitador con calefacción y pantalla digital PC-420D marca Corning™.

Figura 11. **Agitador con calefacción y pantalla digital PC-420D marca Corning™**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio La Perlita, Gto, México.

- **Espectrofotómetro UV/VIS (Metrología)**

Para el análisis de la oxidación anódica electrolytica del colorante Acid Red 1 en las muestras trabajadas se utilizó un espectrofotómetro UV/VIS marca PerkinElmer modelo Lambda 35, el cual está conectado a un monitor que procesa los datos generados.

Figura 12. **Espectrofotómetro UV/VIS marca PerkinElmer modelo Lambda 35**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio La Perlita, Gto, México.

- Fuente de alimentación

El siguiente instrumento proporcionó un voltaje de salida grueso y fino, un control de limitación de corriente con cruce automático de voltaje y corriente.

Figura 13. **Fuente de Alimentación conmutada marca BK Precision 1665**

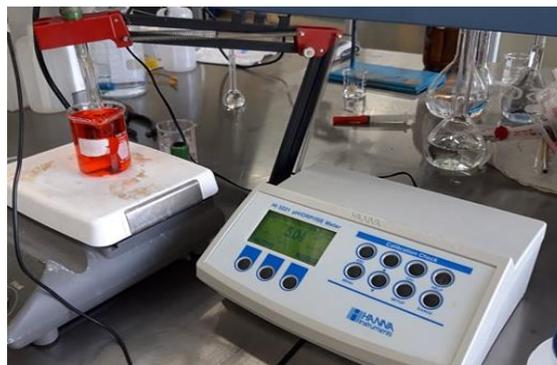


Fuente: elaboración propia, Laboratorio La Perlita, Gto, México.

- pH/ORP/ISE metro

Para medir el pH de cada muestra trabajada de utilizará un pH/ORP/ISE metro marca Hanna Instruments.

Figura 14. **pH/ORP/ISE metro marca Hanna Instruments**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio La Perlita, Gto, México.

3.6.3. Reactivos

- Cloruro de Sodio

Tabla V. **Especificaciones Cloruro de Sodio**

Especificaciones A.C.S.	
Ensayo [NaCl]	99,0 % min
Materia insoluble	0,005 % máx
Formula molecular	NaCl
Peso molecular	58,44 g/mol
Densidad	2,16 g/cm ³

Fuente: karal.com. *Hoja técnica Cloruro de Sodio*. <http://www.karal.com.mx>. Consulta: marzo de 2020.

- Colorante Acid Red 1

Tabla VI. **Especificaciones del colorante Acid Red 1**

Especificaciones A.C.S.	
Contenido de tinte	60 %
Número según <i>Colour Index</i>	18050
Formula molecular	C ₁₈ H ₁₃ N ₃ Na ₂ O ₈ S ₂
Peso molecular	509,43 g/mol

Fuente: Sigmaaldrich. *Hoja técnica Acid Red 1*. <https://www.sigmaaldrich.com/>. Consulta: marzo de 2020.

- Sulfato de Sodio

Tabla VII. **Especificaciones del Sulfato de Sodio**

Especificaciones A.C.S.	
Ensayo [Na ₂ SO ₄]	99,0 % min
Materia insoluble	0,01 % máx
Formula molecular:	Na ₂ SO ₄
Peso molecular	142,04 g/mol
Densidad	2,7 g/cm ³

Fuente: karal.com. *Hoja técnica del Sulfato de Sodio*. <http://www.karal.com.mx>. Consulta: marzo de 2020.

- Sulfato Ferroso

Tabla VIII. **Especificaciones del Sulfato Ferroso**

Especificaciones A.C.S.	
Ensayo [FeSO ₄ •7H ₂ O]	99,9 % min
Materia insoluble	0,008 % máx
Formula molecular:	FeSO ₄ •7H ₂ O
Peso molecular	278,2 g/mol

Fuente: Reactivos y equipos. *Hoja técnica del Sulfato Ferroso*.
<https://reactivosyequipos.com.mx>. Consulta: marzo de 2020.

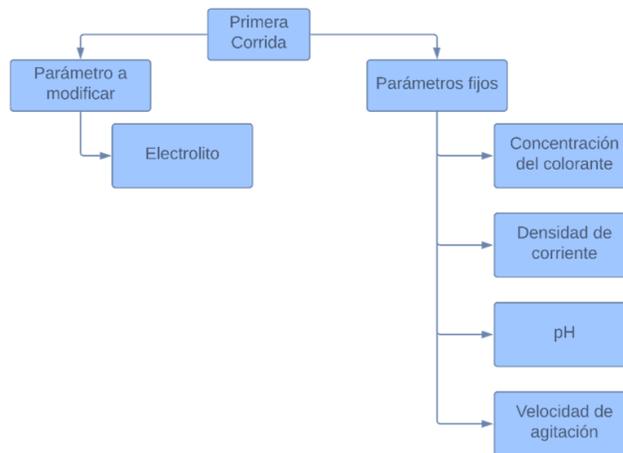
3.7. **Técnica cualitativa**

El método aplicado será la oxidación anódica electrolítica de compuestos orgánicos aromáticos empleando técnicas electroquímicas aplicadas.

3.8. Recolección y ordenamiento de la información

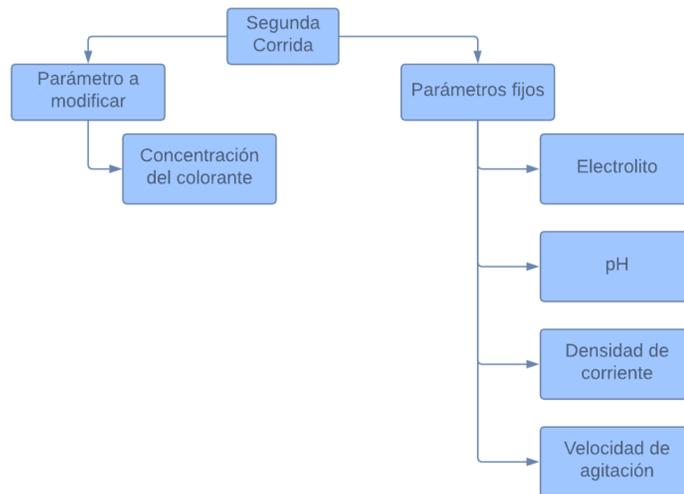
Para la recolección de la información se fijarán cuatro parámetros y modificará uno, de la siguiente manera:

Figura 15. **Diagrama de condiciones para llevar a cabo la primera corrida del trabajo de investigación**



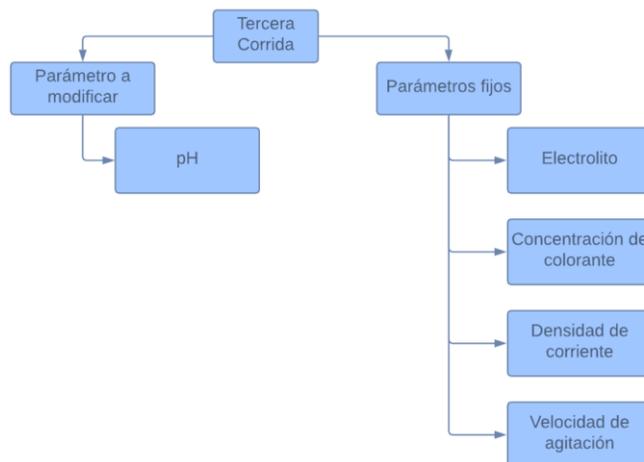
Fuente: elaboración propia, empleando LucidChart.

Figura 16. **Diagrama de condiciones para llevar a cabo la segunda corrida del trabajo de investigación.**



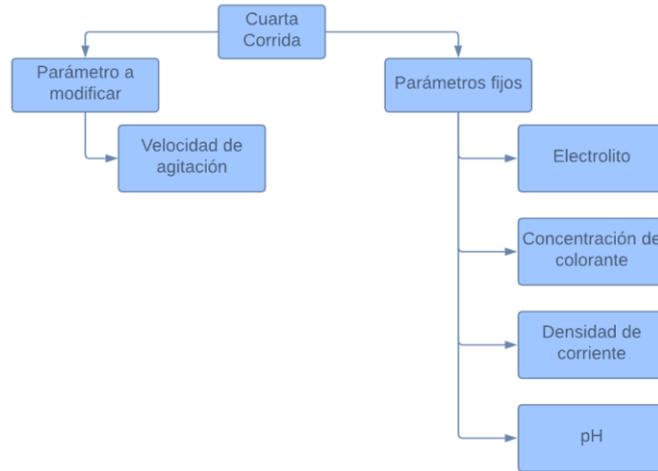
Fuente: elaboración propia, empleando LucidChart.

Figura 17. **Diagrama de condiciones para llevar a cabo la tercera corrida del trabajo de investigación**



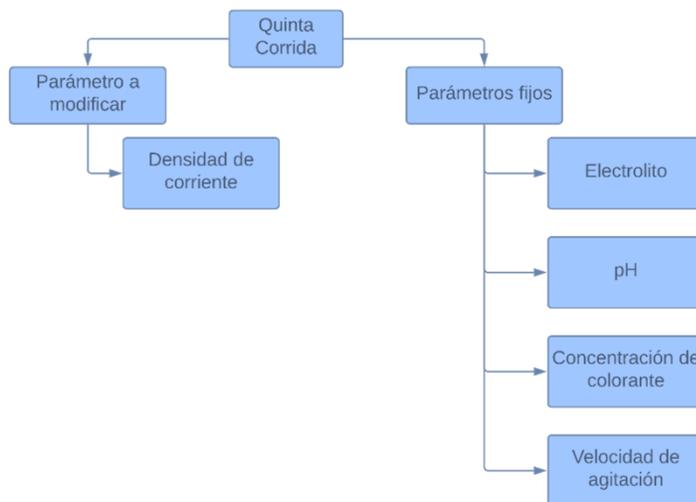
Fuente: elaboración propia, empleando LucidChart.

Figura 18. **Diagrama de condiciones para llevar a cabo la cuarta corrida del trabajo de investigación**



Fuente: elaboración propia, empleando LucidChart.

Figura 19. **Diagrama de condiciones para llevar a cabo la quinta corrida del trabajo de investigación.**



Fuente: elaboración propia, empleando LucidChart.

3.10.1. Media aritmética de la muestra

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

- \bar{x} = *media aritmética*
- x_1, x_2, \dots, x_n = *valores de la muestra*
- n = *tamaño de la muestra*

3.10.2. Varianza de la muestra

$$s^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Fuente: WALPOLE, Ronald. Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. p. 303.

Donde:

- s^2 = *varianza de la muestra*
- \bar{x} = *media aritmética*
- x_i = *valor de la muestra*
- n = *tamaño de la muestra*

3.10.3. Desviación de la muestra

$$s = \sqrt{s^2} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

- $s = \text{desviación estandar de la muestra}$
- $s^2 = \text{varianza de la muestra}$

3.11. Plan de análisis de datos

Para analizar los datos obtenidos del trabajo de investigación se utilizaron las siguientes formulas:

3.11.1. Métodos y modelos de los datos según tipo de variables

Para el análisis de los datos obtenidos se utilizó la siguiente formula:

3.11.1.1. Porcentaje de color removido del colorante Acid Red 1

$$\% CR = \left(\frac{A_0 - A_t}{A_0} \right) \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

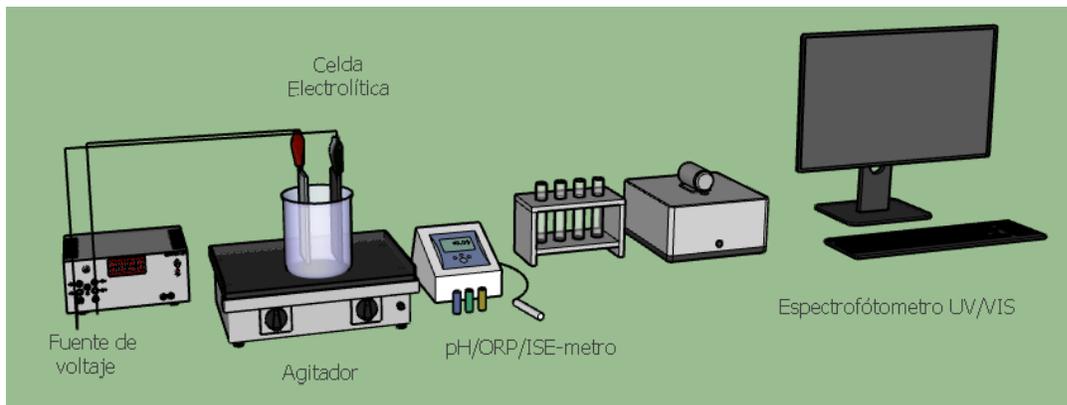
Donde:

- $\% CR = \text{Porcentaje de color removido}$
- $A_0 = \text{Absorbancia en tiempo cero a longitud de onda máxima}$
- $A_t = \text{Absorbancia en tiempo t a longitud de onda máxima}$

3.11.1.2. Unidad experimental a utilizar

El siguiente diagrama isométrico ilustra la unidad experimental a utilizada.

Figura 20. **Perspectiva caballera de la unidad experimental**



Fuente: elaboración propia, empleando Sketchup Pro 2018.

Figura 21. **Perspectiva isométrica de la unidad experimental**



Fuente: elaboración propia, empleando Sketchup Pro-2018.

3.11.2. **Programas utilizados para el análisis de datos**

Para el análisis de los resultados obtenidos en el trabajo de graduación se hizo uso de los siguientes programas:

3.11.2.1. Microsoft Word 2019

Para el procesamiento de textos, resultados y presentación final se hará uso del programa informático Microsoft Word 2019.

3.11.2.2. Microsoft Excel 2019

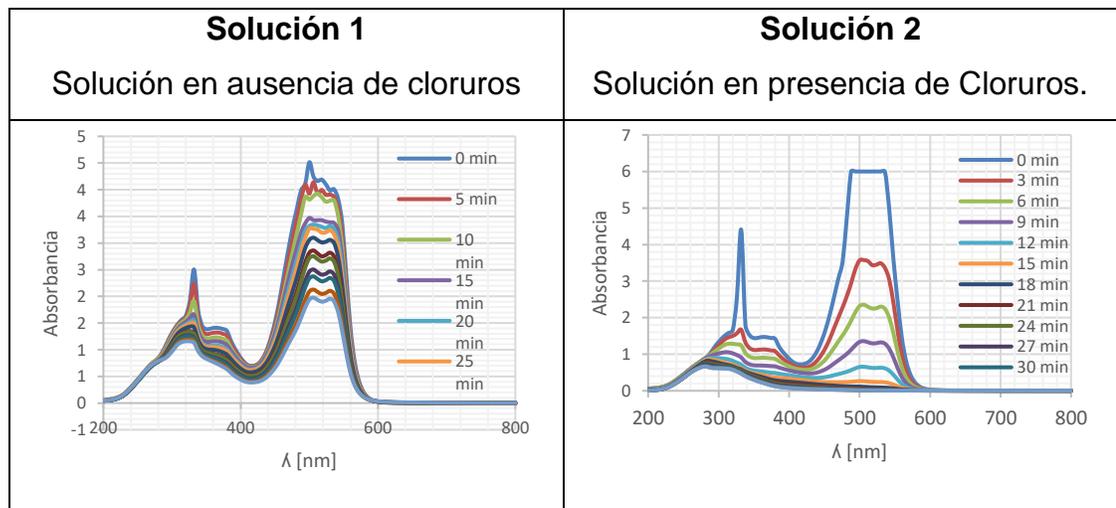
Para el procesamiento de datos, gráficos, cálculos matemáticos, validación de hipótesis y análisis estadístico se hará uso del programa informático Microsoft Excel 2019.

3.11.2.3. UV WinLab Explorer

Es el software de control de instrumentos y manipulación de datos para la última gama de espectrofotómetros UV/Vis de PerkinElmer LAMBDA.

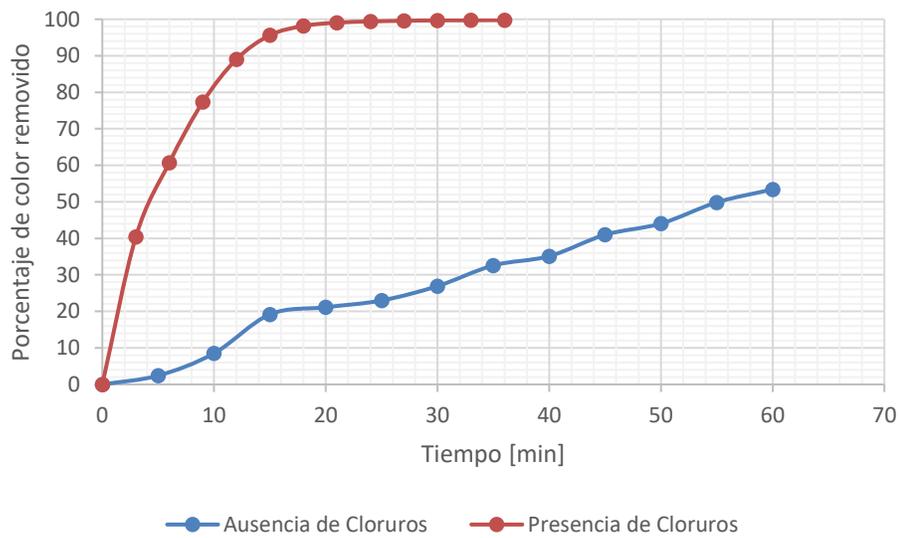
4. RESULTADOS

Tabla X. **Espectro de absorción para evaluar la influencia de cloruros en el proceso de oxidación anódica electrolytica del colorante textil Acid Red 1**



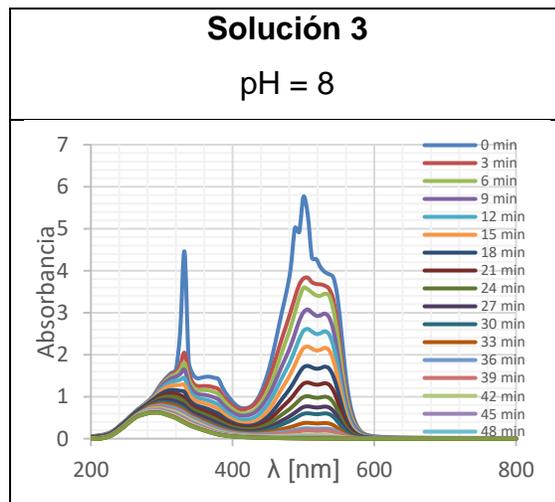
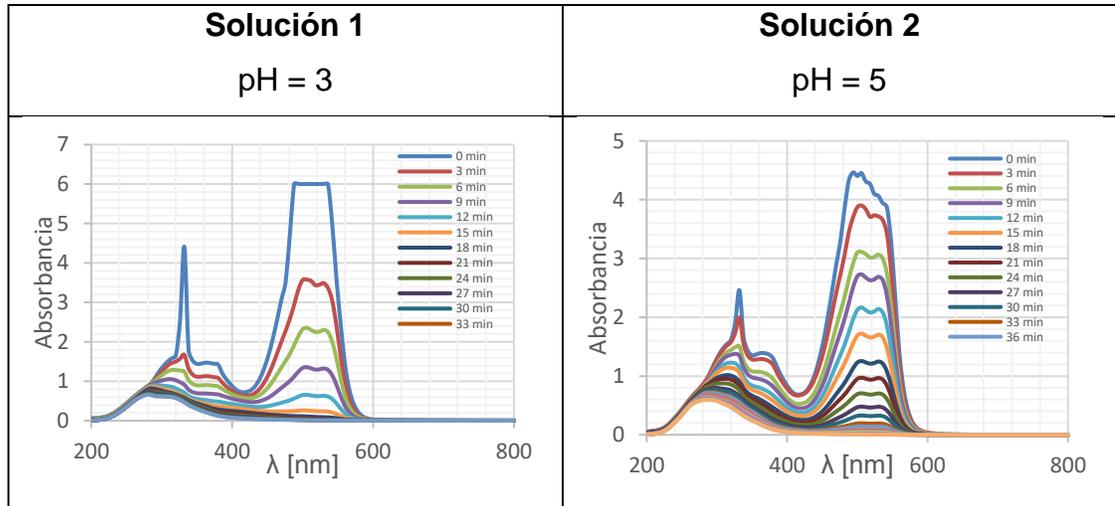
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Porcentaje de colorante Acid Red 1 removido en función el tiempo para evaluar la influencia de cloruros en el proceso de oxidación anódica electrolytica del colorante textil Acid Red 1**



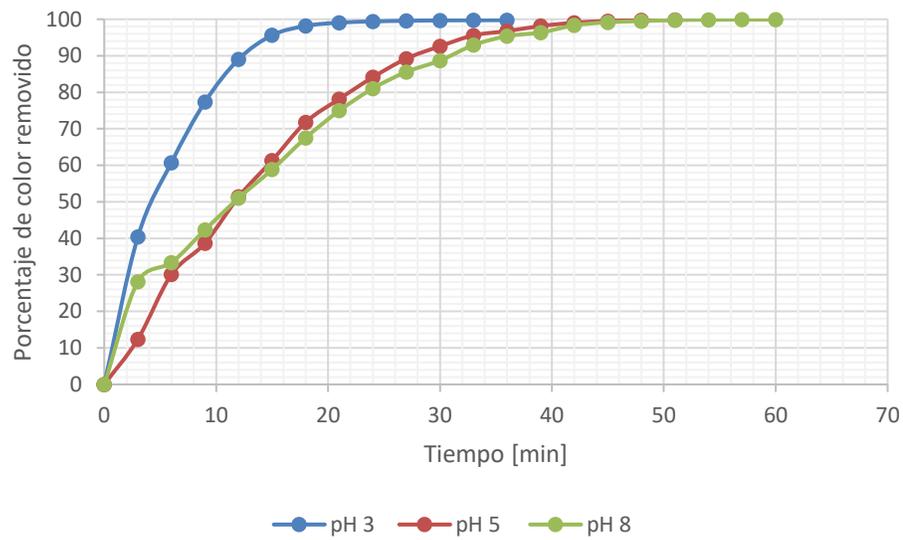
Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Espectro de absorción para analizar el efecto del pH en el proceso de oxidación anódica electrolytica del colorante textil Acid Red 1**



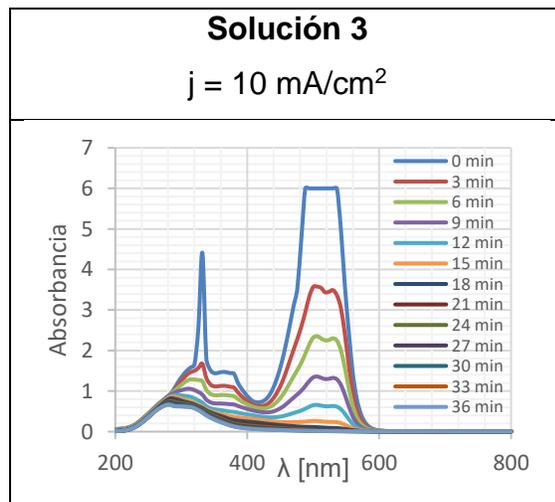
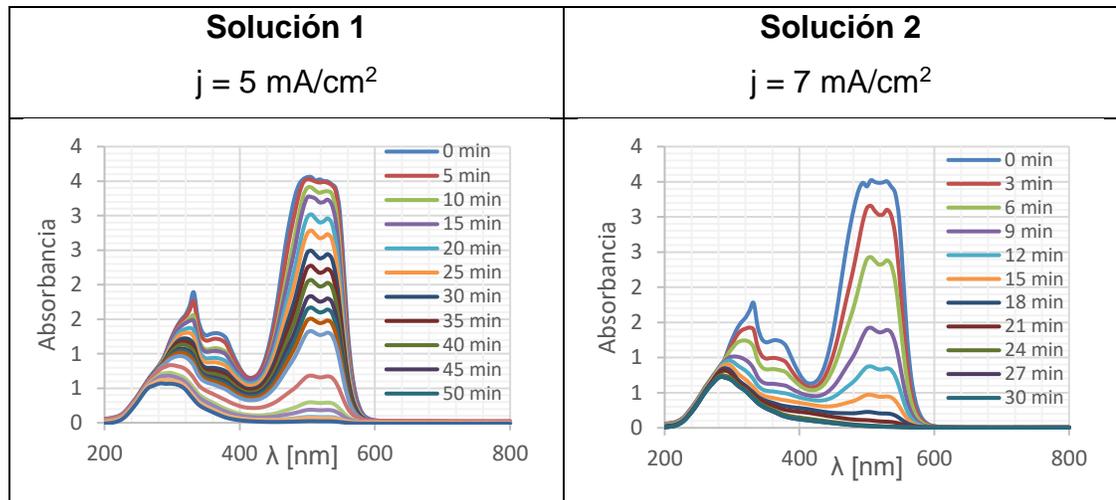
Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Porcentaje de colorante Acid Red 1 removido en función del tiempo para analizar el efecto del pH en el proceso de oxidación anódica electrolytica del colorante textil Acid Red 1**



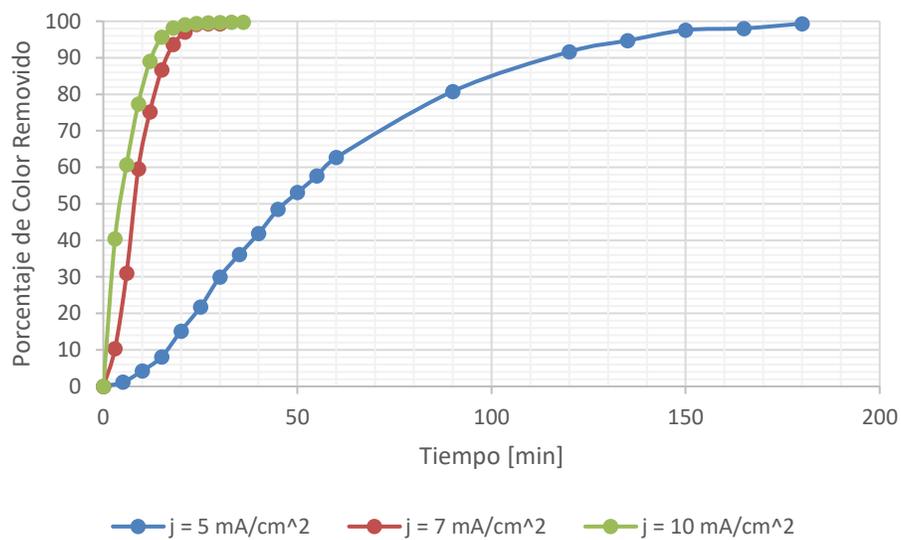
Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Espectro de absorción para determinar la densidad de corriente óptima en el proceso de oxidación anódica electrolytica del colorante textil Acid Red 1**



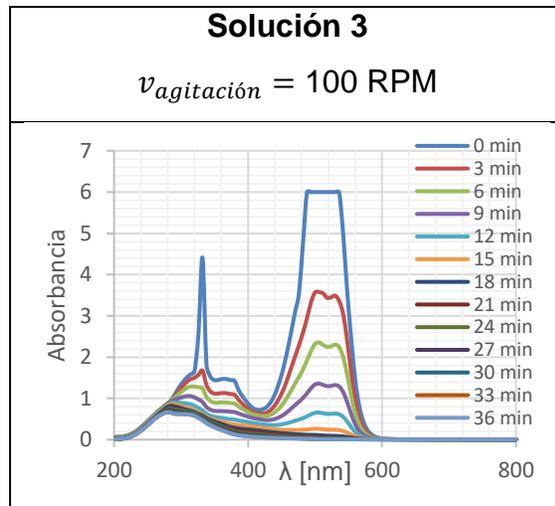
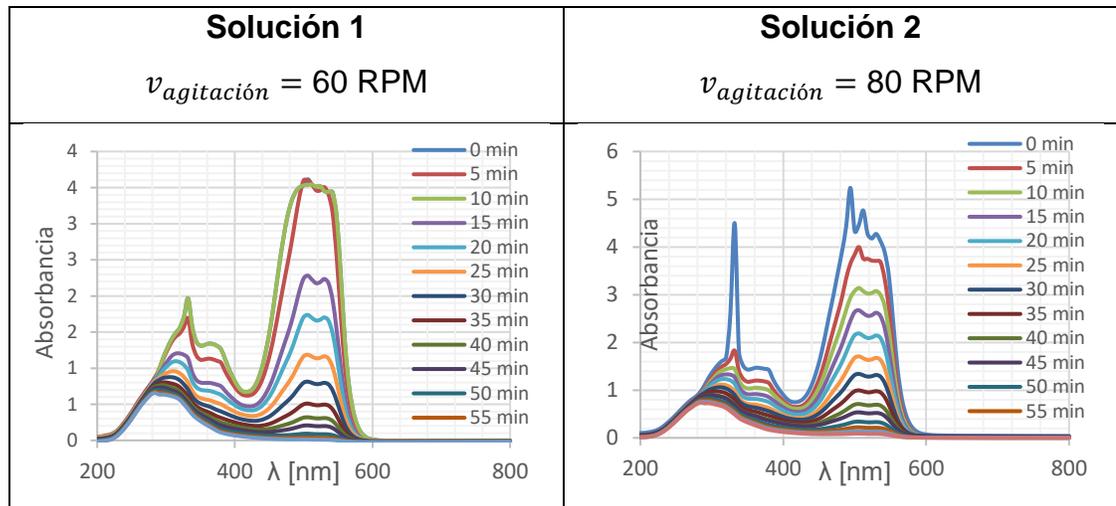
Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Porcentaje de colorante Acid Red 1 removido en función el tiempo para determinar la densidad de corriente óptima en el proceso de oxidación anódica electrolytica del colorante textil Acid Red 1**



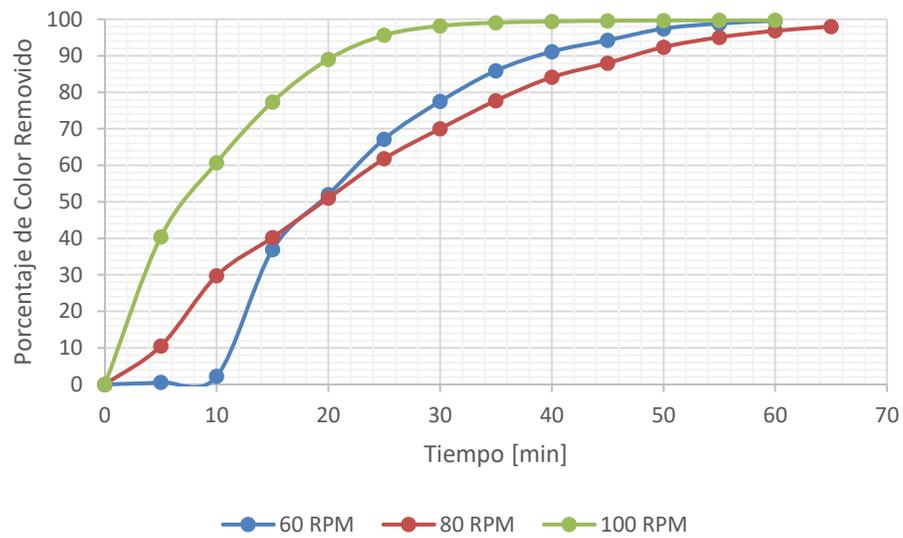
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Espectro de absorción para examinar la influencia de la velocidad de agitación (rpm) en el proceso de oxidación electrolytica del colorante textil Acid Red 1**



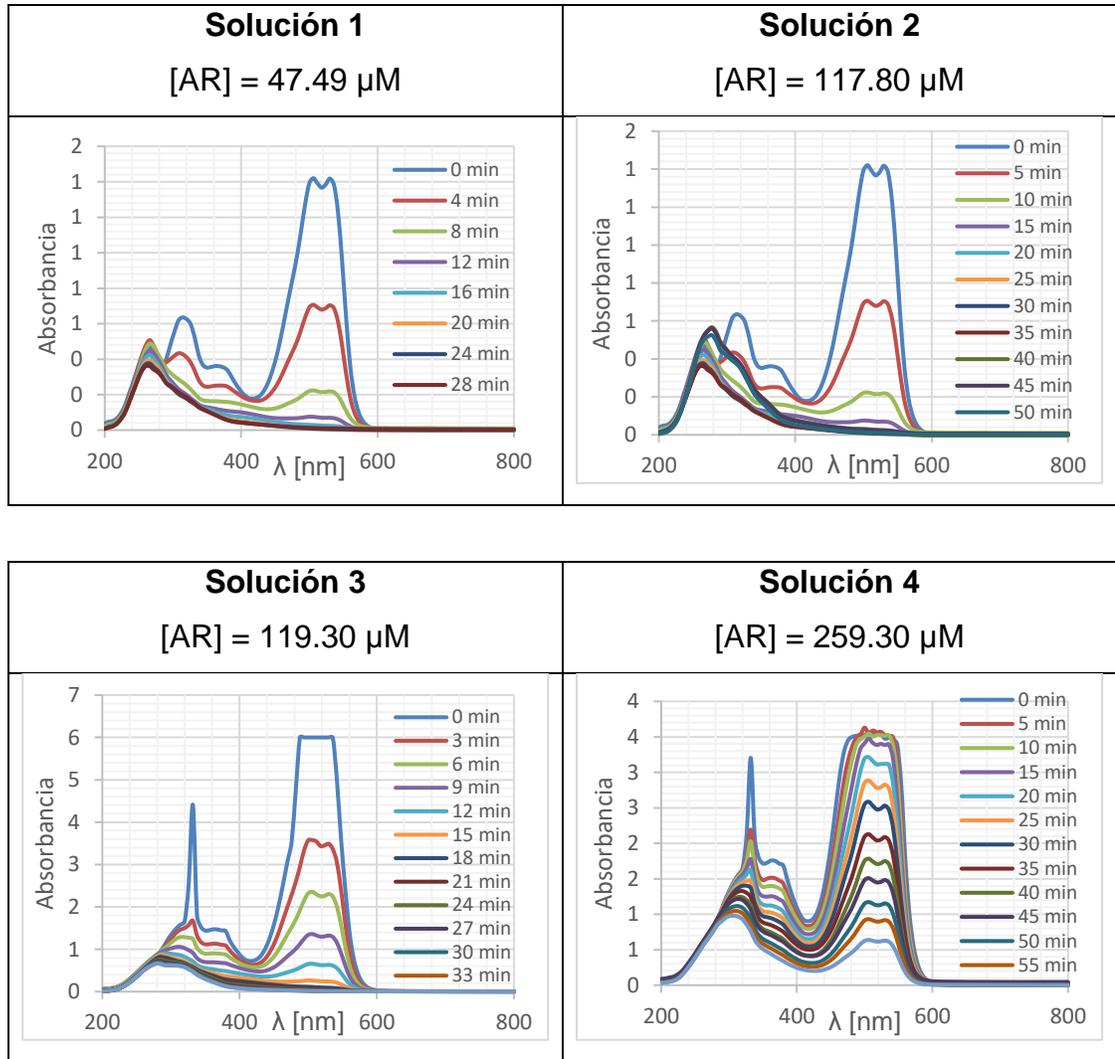
Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Porcentaje de colorante Acid Red 1 removido en función el tiempo para examinar la influencia de la velocidad de agitación (rpm) en el proceso de oxidación electrolytica del colorante textil Acid Red 1**



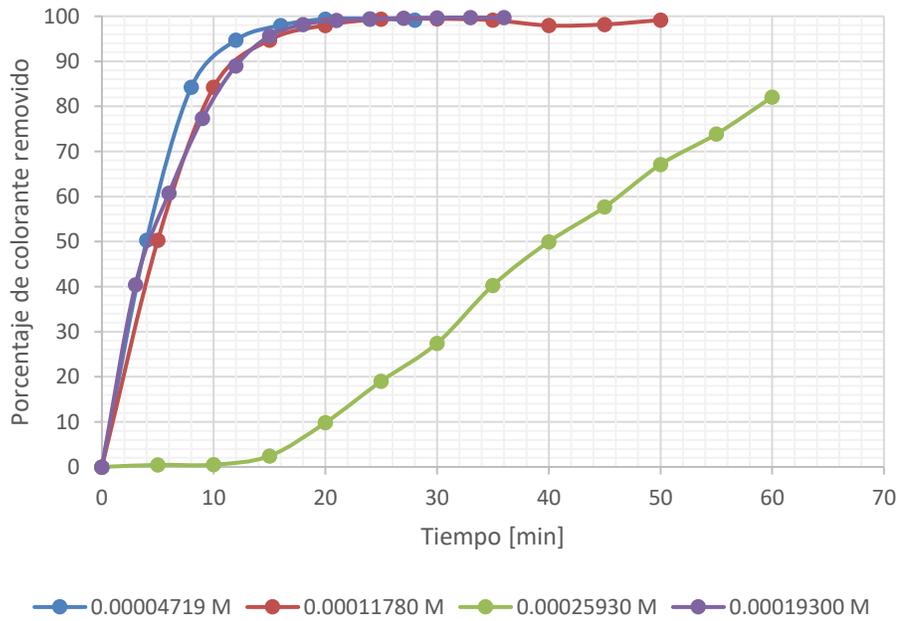
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. Espectro de absorción para analizar la variación de la concentración del colorante durante el proceso de oxidación anódica electrolytica del colorante textil Acid Red 1



Fuente: elaboración propia.

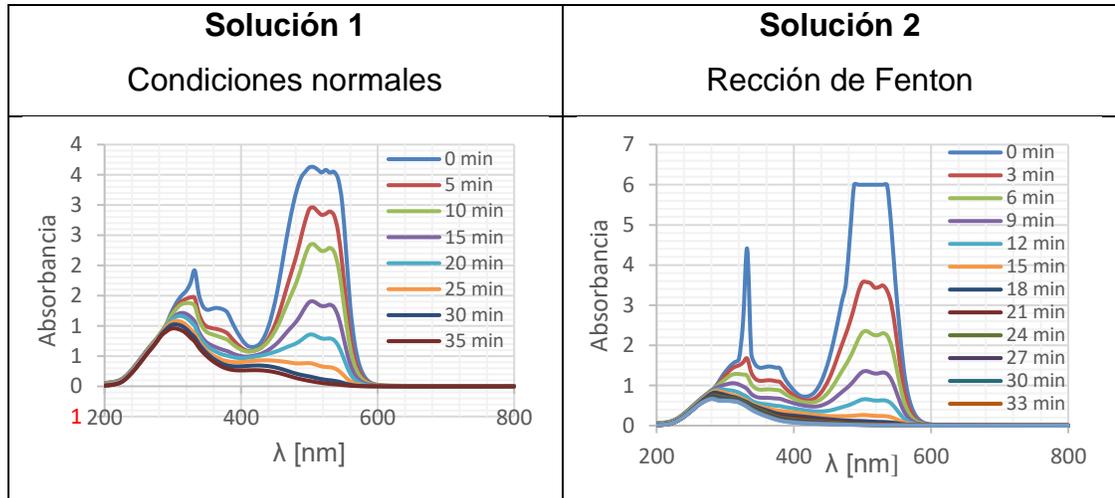
Figura 26. **Porcentaje de colorante Acid Red 1 removido en función el tiempo para analizar la variación de la concentración del colorante durante el proceso de oxidación anódica electrolytica del colorante textil Acid Red 1**



Fuente: elaboración propia.

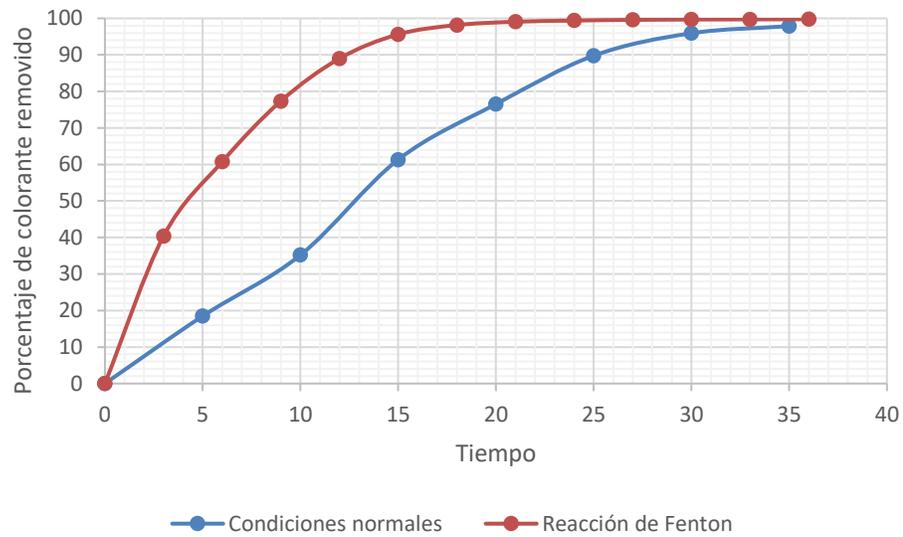
Tabla XV. **Espectro de absorción para la reacción de Fenton del proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante textil Acid Red**

1



Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Porcentaje de colorante Acid Red 1 removido en función el tiempo para la reacción de Fenton del proceso de oxidación anódica electrolytica del colorante textil Acid Red 1**



Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El objetivo de llevar a cabo una oxidación anódica electrolítica empleando electrodos de Dióxido de Rutenio sobre Titanio y fieltro de Grafito se debe a que estos no han sido utilizados con anterioridad, se caracterizan por ser estables y por brindar una alta eficiencia. Es necesario obtener las condiciones óptimas de trabajo al conseguir un porcentaje máximo de decoloración en un menor tiempo y eficiencia de oxidación que estos pueden alcanzar variando los parámetros de electrolitos en solución, concentración de colorante, pH, velocidad de agitación y densidad de corriente.

En la tabla 4 se muestra la curva de espectro visible del primer experimento, el cual consistió en utilizar dos electrolitos, los cuales fueron, para la primera corrida únicamente Sulfato de Sodio con una concentración de 25 mM y para la segunda corrida una mezcla de Cloruro de Sodio a una concentración de 35 mM y Sulfato de Sodio con una concentración de 25 mM. Para ambas corridas se establecieron como condiciones de trabajo, una densidad de corriente de 10 mA/cm², [Acid Red 1] = 193 μM y velocidad de agitación de 100 RPM.

En la figura 21 se caracteriza el porcentaje de remoción del colorante en función del tiempo, se observa que en la corrida dos se degrada el colorante a una mayor velocidad, luego de veinte minutos se puede observar que el colorante se ha removido en un 90 %, mientras que para la primera corrida solo se removió un 20 % en el mismo tiempo. Se evidencia que se obtuvo una mayor eficiencia de remoción del colorante en la corrida dos, debido al electrolito en solución.

El motivo de evaluar la influencia de los electrolitos en solución en el proceso de oxidación anódica se debe a que el resultado depende de la naturaleza de las especies presentes.

El agregar Cloruro de Sodio a la solución favorece la producción de iones OH⁻ y iones Cl⁻, encargados de la degradación de la molécula Acid Red 1. El agregar sulfato de sodio a la segunda corrida solo mejora la conductividad de la solución, facilitando la electrólisis.

En la tabla 5 se muestra la curva de espectro visible del segundo experimento, el cual se basó en modificar el pH de la solución de Cloruro de Sodio y Sulfato de Sodio utilizada, se trabajó a un pH de 3, 5 y 8. Las condiciones de trabajo fueron, densidad de corriente de 10 mA/cm², [Acid Red 1] = 193 μM y velocidad de agitación de 100 RPM.

En la figura 22 se caracterizó el porcentaje de color removido en función del tiempo para los tres pH utilizados. El análisis por medio de la pendiente interpreta que a un pH ácido la remoción del colorante se lleva a cabo en un menor tiempo, mientras que, a un pH básico, el tiempo de degradación es mayor. Es de debe a que a pH 3, se favorece la producción de radicales libres, encargados de la decoloración del colorante Acid Red 1.

En la tabla 6 se grafica la curva de espectro visible del tercer experimento el cual consistió en trabajar tres densidades de corriente, las cuales fueron de 5, 7 y 10 mA/cm² trabajando con la solución mixta de Cloruro de Sodio a una concentración de 35 mM y Sulfato de Sodio con una concentración de 25 mM. Para ambas corridas se establecieron como condiciones de trabajo, [Acid Red 1] = 193 μM y velocidad de agitación de 100 RPM.

En la figura 23 se muestra el porcentaje de color removido en función del tiempo para estas condiciones. La pendiente indica que al aumentar la densidad de corriente, favorece la degradación del colorante, esto se debe a que a una mayor densidad de corriente se aumenta el número de electrones transferidos por unidad de área. De igual manera, trabajando con una menor densidad de corriente se podría lograr la degradación completa del colorante, pero en un mayor tiempo y aumentaría el costo de energía.

En la tabla 7 se muestran la curva de espectro visible del cuarto experimento el cual se basa en modificar la velocidad de agitación de la solución las cuales fueron de 60, 80 y 100 RPM. Se trabajó con la solución mixta de Sulfato de Sodio y Cloruro de Sodio y se establecieron condiciones de trabajo siendo estas, la concentración de Acid Red 1 de $193 \mu\text{M}$ y densidad de corriente de 10 mA/cm^2 .

En la figura 24 se gráfica el porcentaje de color removido en función del tiempo para las condiciones mencionadas anteriormente y por medio del análisis de la pendiente se interpreta que a una mayor velocidad de agitación se obtiene la degradación del colorante Acid Red en un menor tiempo. El aumentar la velocidad de agitación de la muestra favorecerá la reacción, ayudando a la producción de H_2 (g), Cl_2 (g) y OH^- (ac). La causa de esto se debe a que hay una mayor transferencia de electrones por convección, porque todas las moléculas entran en contacto con el electrodo, acelerando la reacción y de esa manera aumentando la velocidad de degradación del colorante Acid Red 1.

Para el quinto experimento se varió la concentración del colorante Acid Red 1, siendo estas $47,19 \mu\text{M}$, $117,80 \mu\text{M}$, $199,30 \mu\text{M}$ y $259,30 \mu\text{M}$. En la tabla 8 se muestra la curva de espectro visible para las concentraciones mencionadas. Se trabajó con una solución mixta de Sulfato de Sodio y Cloruro de Sodio.

Para este experimento se establecieron las siguientes condiciones de trabajo, una velocidad de agitación de 100 RPM, densidad de corriente de 100 mA/cm².

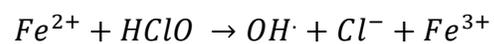
En la figura 25 se muestra el porcentaje de color removido en función del tiempo del quinto experimento y por medio de la pendiente se puede interpretar que a una menor concentración de colorante Acid Red, el mismo se degradará en un menor tiempo, obteniéndose que, en un tiempo aproximado de 15 minutos, este se habrá degradado en un 90 %.

Las condiciones óptimas de degradación se alcanzaron trabajando con una solución mixta de sales conductoras con una concentración de 25 mM de Na₂SO₄ y 35 mM de NaCl, concentración de colorante Acid Red 1 de 47,19 μM, densidad de corriente de 10 mA×cm², velocidad de agitación de 100 RPM y un pH de 3, alcanzando un porcentaje de decoloración del 99,14 %.

En la figura 26 se realizó la comparación de la reacción de Fenton con las condiciones óptimas de trabajo mencionadas anteriormente y se obtuvo que, en los primeros cinco minutos de la reacción de Fenton, el colorante ya se había removido en un 55 % mientras que, en condiciones normales, este solo había un porcentaje de decoloración de un 10 %. La reacción de Fenton incrementó la velocidad de degradación del colorante consiguiendo un 99,76 % de decoloración del mismo.

La razón principal de llevar a cabo este proceso se debe a que se busca optimizar el proceso de degradación de materia orgánica en efluentes que contienen altas concentraciones de cloro activo. Al llevar a cabo una reacción de Fenton, se favorece la producción de radicales OH, encargados de la degradación de la misma.

La reacción que se tuvo en el experimento fue:



Para demostrar la degradación del colorante es necesario llevar a cabo un análisis de subproductos formados mediante un proceso de técnicas cromatográficas y de esta manera verificar la existencia de compuestos menos tóxicos.

CONCLUSIONES

1. Es viable llevar a cabo una oxidación anódica electrolítica del compuesto aromático Acid Red 1 empleando un ánodo de Dióxido de Rutenio sobre Titanio y un cátodo de Filtro de grafito.
2. Se determinó que para efectuar la oxidación anódica electrolítica del compuesto aromático Acid Red 1 es necesario tener ambas especies electrolíticas presentes, tanto Cloruro de Sodio como Sulfato de Sodio para obtener un porcentaje de decoloración de 99,16 %.
3. Se evidenció el efecto que el pH tiene sobre el proceso de oxidación anódica electrolítica del compuesto aromático Acid Red 1, concluyéndose que para obtener un porcentaje de decoloración de 99 % se debe de trabajar a un pH de 3.
4. Se examinó la influencia de la velocidad de agitación, en revoluciones por minuto, para el proceso de oxidación anódica electrolítica del colorante Acid Red 1 y se obtuvo que el tener una mayor velocidad de agitación favorecerá la velocidad de degradación del mismo.
5. La concentración del colorante textil Acid Red 1 en la muestra, es directamente proporcional a la velocidad de degradación del colorante al llevar a cabo la oxidación anódica electrolítica.

6. Llevar a cabo la reacción de Fenton aumentó la velocidad de degradación del colorante, alcanzando un 99,14 % de decoloración del colorante en 18 minutos, siendo esta reacción efectiva a un pH de 3 para favorecer la producción de OH, encargados de degradar la materia orgánica presente.

7. Las condiciones óptimas de decoloración se alcanzaron trabajando con ambas especies presentes, siendo estas Cloruro de Sodio y Sulfato de Sodio a una concentración de 35 mM y 25 mM, respectivamente. Concentración de colorante Acid Red 1 de 47,19 μM , densidad de corriente de 10 mA \times cm², velocidad de agitación de 100 RPM y un pH de 3 obteniéndose un porcentaje de decoloración del 99,13 %.

RECOMENDACIONES

1. Aumentar el área de superficie activa del ánodo respecto a la solución electrolítica, para obtener un mejor rendimiento en la reacción.
2. Variar el pH de la solución que contiene el electrolito para favorecer la producción de radicales libres y obtener una mejor eficiencia en el proceso de degradación.
3. Tomar una muestra cada minuto, para concentraciones de colorante menores a 47,49 μM , de esta manera se obtendrá una mejor caracterización del color removido, pues este se degradará a una mayor velocidad.
4. Trabajar estrictamente a pH un ácido para llevar a cabo el proceso de Fenton, se recomienda preferentemente un pH de 3, pues de otra manera el hierro precipitará desfavoreciendo la reacción.
5. Utilizar agua desionizada, para realizar experimentos similares a la presente investigación ya que de esta manera no intervendrá en los resultados del experimento.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGULAR, Zaira. *Síntesis y caracterización de un ánodo de óxidos de Ir-Sn-Sb que favorezca la oxidación electrocatalítica de compuestos orgánicos persistentes*. Trabajo de graduación de Maestría en Ciencias del Agua. Guanajuato: Universidad de Guanajuato, 2018. 88 p.
2. ARROYAVE ROJAS, Joan Amir; GARCÉS GIRALDO, Luis Fernando; MEJÍA TRUJILLO, Julieta. *Empleo del reactivo de Fenton para la degradación del colorante Tartrazina*. Artículo de la Revista Lasallista de Investigación. Colombia: Universidad de Antioquía, 2009. 10 p.
3. BARILLAS, Enric; MARTÍNEZ-HUITLE, Carlos. *Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods*. Applied Catalysis B: Environmental, 2015. 643 p.
4. CHAGOLLÁN, María Fernanda. *Decoloración y mineralización del colorante textil Acid Red 1 mediante un proceso tipo fotoelectro-Fenton solar empelando ácido hipocloroso producido electrocatalíticamente*. Trabajo de graduación Maestría en Ciencias del Agua). Guanajuato: Universidad de Guanajuato, 2018. 68 p.
5. CHANG, Raymond. *Química*. 9a ed. Ciudad de México: McGraw-Hill, 2007. 1 062 p.

6. COMNINELLIS, Christos. *Electrocatalysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants for wastewater treatment*. Suiza: Electrochimica Acta, 1994. 1862 p.
7. CORNEJO, Oscar. *Degradación electroquímica de un colorante azo mediante oxidación anódica y una reacción tipo Fenton empleando un ánodo de óxidos mixtos*. Trabajo de graduación Maestría en Ciencias del Agua. Guanajuato: Universidad de Guanajuato, 2017. 92 p.
8. FLORENZA, Xavier; SALES SOLANO, Aline María; CENTELLAS Francesc; MARTÍNEZ-HUITLE, Carlos Alberto; BRILLAS, Enric; GARCIA, Sergi. *Degradation of the azo dye Acid Red 1 by anodic oxidation and indirect electrochemical processes based on Fenton's reaction*. Electrochimica Acta, volume 142, 2014. 288 p.
9. GARCÉS GIRALDO, Luis Fernando; MEJÍA FRANCO, Edwin Alejandro; SANTAMARÍA ARANGO, Jorge Julián. *La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales*. Revista Lasallista de Investigación. Colombia: Universidad de Antioquía, 2004. 92 p.
10. GONZÁLEZ-VELASCO, Jaime. *Electroquímica Interfacial*. Cultivalibros, Madrid, 2012. 783 p.
11. HOWE, Kerry. *Principles of Water Treatment*. Estados Unidos: MWH. 2012. 637 p.

12. KEMMER, Frank. *The NALCO Water Handbook*. 2a ed. Estados Unidos: McGraw-Hill, 1987. 1 071 p.
13. LEVINE, Ira. *Fisicoquímica*. 6ta ed. Nueva York: McGraw-Hill, 1991. 1 050 p.
14. MARCANO, Deanna. *Introducción a la Química de los Colorantes*. 2a ed. Caracas: Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, 2018. 254 p.
15. MCCABE, Lauren. *Operaciones básicas de Ingeniería Química*. 4a ed. España: McGraw-Hill, 1991. 1 020 p.
16. PLETCHER, Derek. *A First Course in Electrode Processes*. 2a ed. Universidad de Sheffield: RSCPublishing, 2009. 435 p.
17. WALPOLE, Ronald. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 9a ed. México: Pearson Educación, 2012. 816 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Metodología de Cálculo

A continuación, se describe y detalla cada una de las fórmulas y cálculos realizados para la experimentación del trabajo de graduación.

Para obtener resultados se utilizó:

Porcentaje de color removido del colorante Acid Red 1

$$\% CR = \left(\frac{A_0 - A_t}{A_0} \right) \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

- $\% CR$ = Porcentaje de color removido
- A_0 = Absorbancia en tiempo cero a longitud de onda máxima
- A_t = Absorbancia en tiempo t a longitud de onda máxima

EJEMPLO NO.1: Obtener el porcentaje de color removido de la muestra a los nueve minutos dados los siguientes valores de absorbancia:

- $A_0 = 5,9$
- $A_{t=9 \text{ min}} = 3,2$

$$\% CR = \left(\frac{5,9 - 3,2}{5,9} \right) \times 100$$

$$\% CR = 45,76$$

Continuación apéndice 1.

Para el análisis estadístico:

Media aritmética de la muestra

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

- \bar{x} = *media aritmética*
- x_1, x_2, \dots, x_n = *valores de la muestra*
- n = *tamaño de la muestra*

EJEMPLO NO. 2: Determinar la media aritmética de la muestra dados los siguientes porcentajes de color removido:

- $\% CR_1 = 97,5 \%$
- $\% CR_2 = 95,2 \%$
- $\% CR_3 = 96,3 \%$

$$\bar{x} = \frac{97,5 \% + 95,2 \% + 96,3 \%}{3}$$

$$\bar{x} = 96,34 \%$$

Varianza de la muestra

Continuación apéndice 1.

$$s^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

- $s^2 = \text{varianza de la muestra}$
- $\bar{x} = \text{media aritmética}$
- $x_i = \text{valor de la muestra}$
- $n = \text{tamaño de la muestra}$

EJEMPLO NO. 3: Determinar la varianza de la muestra dados los siguientes porcentajes de color removido:

- $\% CR_1 = 97,5 \%$
- $\% CR_2 = 95,2 \%$
- $\% CR_3 = 96,3 \%$
- $\bar{x} = 96,34 \%$

$$s^2 = \frac{(97,5 - 96,34)^2 + (95,2 - 96,34)^2 + (96,3 - 96,34)^2}{3 - 1}$$

$$s^2 = 1,32$$

Desviación de la muestra

$$s = \sqrt{s^2} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Continuación apéndice 1.

Donde:

- $s = \text{desviación estandar de la muestra}$
- $s^2 = \text{varianza de la muestra}$

Continuación apéndice 1.

EJEMPLO NO. 4: Determinar la desviación estándar de la muestra dada una varianza de 1,32.

$$s = \sqrt{1,32}$$

$$s = 1,15$$

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Electrolisis de una disolución acuosa de cloruro de sodio**

Las reacciones de semicelda en la electrolisis del cloruro de sodio acuoso son:



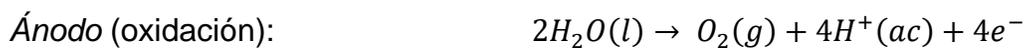
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Electrolisis de una disolución acuosa de sulfato de sodio**

- a) El sulfato de sodio no se hidroliza en agua.
- b) Los iones Na^+ no se reducen en el cátodo y los iones de SO_4^{2-} no se oxidan en el ánodo.

Por lo tanto, las reacciones de oxidación y reducción solo implican moléculas de agua.

Apéndice 4. **Electrolisis del agua**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Electrodos de dióxido de rutenio sobre titanio, como ánodo y fieltro de grafito como cátodo**



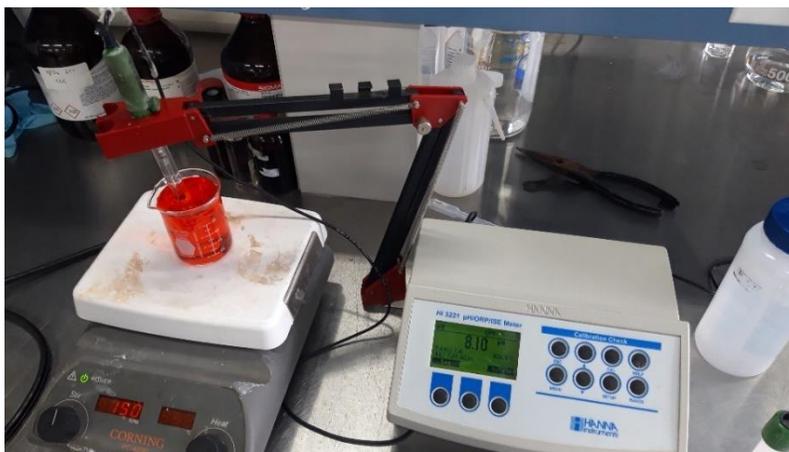
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Sistema construido para llevar a cabo la electrólisis del colorante Acid Red 1**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **pHmetro utilizado para el control del pH en la muestra estudiada**



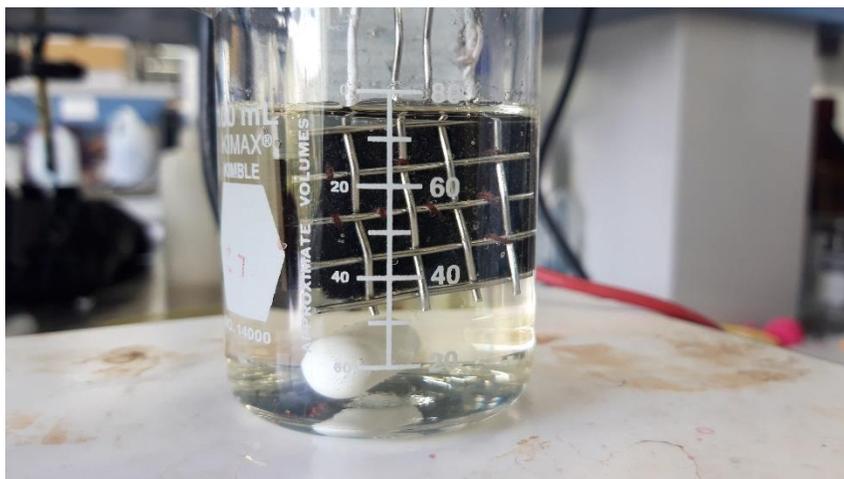
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Evidencia de la producción de OH en el proceso de degradación del colorante Acid Red 1.**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Muestra con un 98 % de color removido del colorante Acid Red 1.**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Toma de muestra cada 3 minutos para ser analizada en el espectrofotómetro**



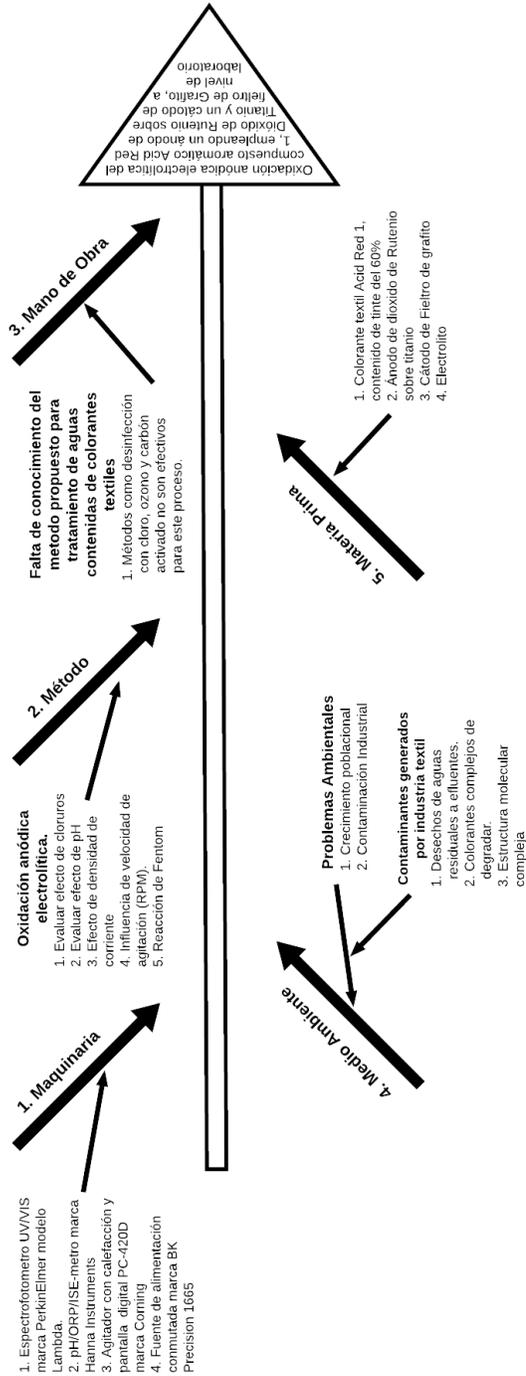
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. Requisitos académicos

Paso No. 1	Paso No. 2	Paso No. 3	Paso No. 4	Paso No. 5	Paso No. 6	Paso No. 7	Paso No. 8
Carrera	Área	Tema Genérico	Tema Específico	Especificación	Problema	Hipótesis	Temario Tentativo
Ingeniería Química	Química	Química 4 Química Orgánica 1 Análisis Cualitativo Fisicoquímica Contaminantes Industriales Estadística 1 Seminario de Investigación	Método electrofítico de oxidación	Presencia o ausencia de cloruros pH Velocidad de agitación Concentración de colorante Efecto de reacción de Fenton	Parte de la contaminación aportada por las industrias son los colorantes textiles. Anteriormente se ha estudiado que la eliminación de estos colorantes es muy compleja debido a la estructura de los mismos. En este trabajo se propone la eliminación de colorantes textiles por medio del método electrofítico de oxidación	Es posible degradar por medio de un método electrofítico de oxidación el colorante textil Acid Red 1 empleando un ánodo de Dióxido de Rutenio sobre Titanio y un cátodo de níctro de grafito.	"Oxidación anódica electrofítica del compuesto aromático Acid Red 1, contenido de tinte del 60% (Amido Nafol Rojo G), utilizado en la industria textil, empleando un ánodo de Dióxido de Rutenio sobre Titanio y un cátodo de níctro de Grafito, a nivel de laboratorio."

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia, empleando Lucidchart