



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

CONDICIONES DE OPERACIÓN FAVORABLES PARA LA REMOCIÓN DEL
COLORANTE TEXTIL DISPERSO TAICRON RED DE UNA SOLUCIÓN MODELO
MEDIANTE EL PROCESO COMBINADO DE ELECTROCOAGULACIÓN Y
CATÁLISIS SOLAR

Línea de investigación:

Tecnologías para residuos y pasivos ambientales. Biorremediación

Tesis para optar el Grado Académico de Doctora en Ingeniería Ambiental

Autora

Concepción Gamarra, Lia Elis

Asesora

Castañeda Perez, Luz Genara

ORCID: 0000-0001-6684-8205

Jurado

Zambrano Cabanillas, Abel Walter

Alva Velásquez, Miguel

Iannacone Oliver, José Alberto

Lima - Perú

2025



CONDICIONES DE OPERACIÓN FAVORABLES PARA LA REMOCIÓN DEL COLORANTE TEXTIL DISPERSO TAICRON RED DE UNA SOLUCIÓN MODELO MEDIANTE EL PROCESO COMBINADO DE ELECTROCOAGULACIÓN Y CATÁLISIS SOLAR

INFORME DE ORIGINALIDAD

25%

INDICE DE SIMILITUD

25%

FUENTES DE INTERNET

4%

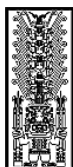
PUBLICACIONES

8%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
2	pirhua.udep.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	1library.co Fuente de Internet	2%
4	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	2%
5	es.scribd.com Fuente de Internet	1%
6	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	1%
7	www.slideshare.net Fuente de Internet	1%
8	fjferrer.webs.ull.es Fuente de Internet	1%



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

CONDICIONES DE OPERACIÓN FAVORABLES PARA LA REMOCIÓN DEL
COLORANTE TEXTIL DISPERSO TAICRON RED DE UNA SOLUCIÓN MODELO
MEDIANTE EL PROCESO COMBINADO DE ELECTROCOAGULACIÓN Y
CATÁLISIS SOLAR

Línea de Investigación:

Tecnologías para residuos y pasivos ambientales. Biorremediación

Tesis para optar el Grado Académico de Doctora en Ingeniería Ambiental

Autora:

Concepción Gamarra, Lia Elis

Asesora:

Castañeda Perez, Luz Genara

ORCID: 0000-0001-6684-8205

Jurado:

Zambrano Cabanillas, Abel Walter

Alva Velásquez, Miguel

Iannacone Oliver, José Alberto

Lima – Perú

2025

Dedicatoria

A mis padres Tobías en el cielo y Zoraida que me acompaña en mi día a día.

A mi hermana Edita con su fuerza, valor y modelo de mujer; quien me ha brindado su apoyo incondicional en los momentos más importantes de mi vida.

A mi sobrina Dianita su compañía me alegro y alegra la vida.

A mis hermanos con quienes nos criamos en unión, armonía y saber.

Agradecimientos

A Dios todopoderoso que con su misericordia permite que continúe la vida en nuestro planeta.

Al Dr. Luis Carrasco por su apoyo incondicional en el desarrollo de la tesis, modelo de profesional dedicado a la investigación y promoción de la misma, excelente persona y amigo.

A la Dra. Luz Castañeda mi asesora, mi amiga, destacada profesional que con su guía y asesoría permitió la mejora de la tesis.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	11
ABSTRACT.....	13
I. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. Planteamiento del problema	15
1.2. Descripción del problema	16
1.3. Formulación del problema.....	17
1.3.1. Problema general.....	17
1.3.2. Problemas específicos.....	18
1.4. Antecedentes	18
1.4.1. Antecedentes Nacionales.....	18
1.4.2. Antecedentes Internacionales	21
1.5. Justificación de la investigación	29
1.6. Limitaciones de la investigación.....	29
1.7. Objetivos de la investigación.....	30
1.7.1. Objetivo general.....	30
1.7.2. Objetivos específicos.....	30
1.8. Hipótesis.....	30
1.8.1. Hipótesis general.....	30
1.8.2. Hipótesis específicas	31
II. MARCO TEÓRICO.....	32
2.1. Remoción del colorante textil	32
2.1.1. Colorantes textiles.....	32
2.1.2. Métodos de tratamientos para los efluentes de colorantes textiles.....	39
2.2. Electrocoagulación	41
2.2.1. Fotocatálisis.....	47
2.3. Colector solar	60
2.3.1. Colector parabólico compuesto	61
2.3.2. Formas de un Colector CPC.....	63
2.3.3. Diseño de un colector parabólico compuesto con concentración.....	64
2.4. Definiciones de términos básicos.....	68
2.4.1. Celdas electrolíticas:.....	68
2.4.2. Fotorreactor	68
2.4.3. Termocuplas o Termopar	68
III. MÉTODO.....	70

3.1.	Tipo de investigación.....	70
3.2.	Población y muestra.....	70
3.3.	Operacionalización de variables	71
3.4.	Instrumentos	72
3.4.1.	Equipos para el desarrollo experimental	72
3.4.2.	Equipos para análisis químico	72
3.4.3.	Reactivos	72
3.4.4.	Materiales	73
3.5.	Procedimiento.....	73
3.5.1.	Diseño del equipo de electrocoagulación y catálisis solar	73
3.5.2.	Diseño y construcción del reactor solar	74
3.5.3.	Tratamiento de las soluciones con colorante textil	78
3.5.4.	Tratamiento aplicado a un agua residual con colorante textil	81
3.5.5.	Análisis de laboratorio de las soluciones tratadas	82
3.6.	Análisis de datos.....	82
3.7.	Consideraciones éticas.....	83
IV.	RESULTADOS	84
4.1.	Respecto al diseño y construcción del equipo de electrocoagulación y reactor solar ...	84
4.2.	Respecto a los tratamientos por electrocoagulación y foto Fenton en el reactor solar.	89
4.2.1.	Tratamiento por electrocoagulación.....	89
4.2.2.	Tratamiento foto Fenton en el reactor solar a la solución de 1000 mg/L	93
4.2.3.	Tratamiento foto Fenton en el reactor solar a la solución de 500 mg/L	98
4.3.	Resultado de los tratamientos adicionales	101
4.4.	Respecto al tratamiento de un colorante industrial	106
4.4.1.	Resultado del tratamiento de la muestra industrial por electrocoagulación	108
4.4.2.	Tratamiento en el reactor solar	112
V.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	115
VI.	CONCLUSIONES	118
VII.	RECOMENDACIONES.....	119
VIII.	REFERENCIAS.....	120
IX.	ANEXOS.....	130
	Anexo A.....	130
	<i>Perfil de colector parabólico compuesto</i>	<i>130</i>
	Anexo B.....	133
	<i>Cálculo de la concentración molar del peróxido de hidrógeno al 30% en volumen</i>	<i>133</i>
	Anexo C.....	134

<i>Determinación de la curva patrón del colorante “taicron-red” en el espectrofotómetro UV-Vis.</i>	134
Anexo D	136
<i>Espectros IR del colorante textil</i>	136
Anexo E	138
<i>Difracción de la luz láser en presencia de nanopartículas.</i>	138
Anexo G	141
<i>Resultados del análisis químico</i>	141
Anexo H	144
<i>Matriz de consistencia</i>	144

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de colorantes en base a la carga iónica	33
Tabla 2. Clasificación de colorantes en base a la solubilidad	37
Tabla 3. Porcentaje de aprovechamiento de los colorantes según tipos de fibras	39
Tabla 4. Métodos para el tratamiento de efluentes textiles	39
Tabla 5. Ventajas y desventajas de la tecnología basada en electrocoagulación	46
Tabla 6. Ventajas y desventajas de la fotocatalisis con TiO_2	55
Tabla 7. Tipos de colectores solares	61
Tabla 8. Operacionalización de variables.....	71
Tabla 9. DQO, para la solución de 1000 mg/L luego de segunda electrocoagulación.....	95
Tabla 10. Concentración y porcentaje de remoción de colorante para 1 g/L y 100 mg de TiO_2	96
Tabla 11. DQO, para la muestra de 500 mg/L de colorante luego de la segunda electrocoagulación..	98
Tabla 12. Concentración y porcentaje de remoción para 0,5 g/L de colorante y 100 mg de TiO_2	99
Tabla 13. Concentración y porcentaje de remoción para 1g/L de colorante y 1000 mg de TiO_2 : Segunda electrocoagulación.....	101
Tabla 14. Concentración y porcentaje de remoción para 0,5 g/L de colorante y 1000 mg de TiO_2 : Segunda electrocoagulación.....	103
Tabla 15. Resultado de los análisis fisicoquímicos luego de un segundo tratamiento para la concentración de referencia de 1 g/L	104
Tabla 16. Resultado de los análisis fisicoquímicos luego de un segundo tratamiento para la concentración de referencia de 0,5 g/L	105
Tabla 17. Resultados de la demanda química de oxígeno de la muestra textil industrial luego del tratamiento combinado	114
Tabla 18. Datos acondicionados de la ejecución de los programas radio.pol, involuta.pol y parábola.pol.	114
Tabla 19. Absorbancia de la muestra de concentración media en función a la longitud de onda	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura química de antrarrufina y crisazina	35
Figura 2. Estructura química de una antraquinona y algunos tintes derivados	36
Figura 3. Estructura química de la Antrarrufina y Crisazina	37
Figura 4. Esquema básico de la electrocoagulación con electrodos de aluminio y hierro	43
Figura 5. Especies poliméricas de aluminio formadas en la electrocoagulación	45
Figura 6. Representación de la fotocatalisis sobre la superficie de TiO ₂	48
Figura 7. Proceso de formación de radicales por acción de la radiación solar	52
Figura 8. Efecto del pH en la adsorción de materia orgánica.	54
Figura 9. Ubicación de la luz visible en el espectro electromagnético	58
Figura 10. Espectro energético del sol	59
Figura 11. Esquema de un colector parabólico compuesto	63
Figura 12. Modelos de colectores solares bidimensionales	64
Figura 13. Esquema del diseño del colector parabólico compuesto	65
Figura 14. Combinación de elementos geométricos que constituyen CPC	66
Figura 15. Simulación de la forma geométrica del colector parabólico compuesto.	67
Figura 16. Simulación de la forma geométrica del colector parabólico compuesto	67
Figura 17. Soluciones modelo de colorante “taicron-red” de 1000 mg/L y 500 mg/L	77
Figura 18. Tratamiento de las soluciones en el foto reactor solar	78
Figura 19. Muestra del agua residual de la industria textil	81
Figura 20. Panel solar ensamblado en un soporte móvil traslacional y rotacional	84
Figura 21. Colector parabólico compuesto (fotorreactor).....	84
Figura 22. La celda electrolítica y sus respectivos electrodos	85
Figura 23. Bomba centrífuga de corriente continua.....	86
Figura 24. Equipo para el proceso combinado de electrocoagulación y catálisis solar construido en la presente investigación.....	87
Figura 25. Diagrama de flujo general del tratamiento por electrocoagulación y foto Fenton con radiación solar (catálisis solar).....	88
Figura 26. Solución acuosa de colorante taicron-red de 1g/L y 0,5 g/L respectivamente	89
Figura 27. Proceso de electrocoagulación del colorante taicron-red 1000 mg/L.....	90
Figura 28. Flóculos sobrenadantes en la solución tratada.....	90
Figura 29. Proceso de decantación del floculo (hidróxido de aluminio con colorante disperso)	91
Figura 30. Segunda electrocoagulación del líquido filtrado.	91
Figura 31. Proceso de decantación proveniente de la segunda electrocoagulación	93
Figura 32. Tratamiento del agua de la primera electrocoagulación	94
Figura 33. Solución circulante sometido a la foto oxidación.....	94

Figura 34. Cinética de la demanda química de oxígeno para una concentración inicial de 1 g/L	95
Figura 35. Proceso de neutralización del hierro remanente	95
Figura 36. Evolución temporal de la concentración de colorante	97
Figura 37. Proceso de neutralización del hierro remanente	97
Figura 38. Cinética de la demanda química de oxígeno para una concentración inicial de 500 mg/L de colorante.....	99
Figura 39. Evolución temporal de la concentración de colorante 0,5 g/L de colorante y 100 mg de TiO ₂	100
Figura 40. Evolución temporal de la concentración de colorante 1 g/L de colorante y 1000 mg de TiO ₂ : Segunda electrocoagulación.....	102
Figura 41. Evolución temporal de la concentración de colorante 0.5 mg/L de colorante y 1000 mg de TiO ₂ : Segunda electrocoagulación	104
Figura 42. Cinética de degradación de la DQO para la concentración de referencia de 1 g/L	105
Figura 43. Cinética de degradación de la DQO para la concentración de referencia de 0,5 g/L	106
Figura 44. Diagrama de flujo del tratamiento aplicado al agua residual con colorante textil.....	107
Figura 45. Celda electrolítica dispuesta para el inicio del proceso de electrocoagulación	107
Figura 46. Proceso de electrocoagulación con formación de floculos ligero y disperso en la solución	108
Figura 47. Floculos sobrenadante expuesto en un vaso de precipitado	108
Figura 48. Muestra original, muestra tratada por electrocoagulación decantada y muestra filtrada..	109
Figura 49. Segunda electrocoagulación del colorante industrial	110
Figura 50. Segunda electrocoagulación del líquido filtrado de la solución	112
Figura 51. Agua de tratamiento con contenido de hierro y peróxido de hidrógeno	112
Figura 52. Proceso de decantación.....	113
Figura 53. Perfil del colector parabólico compuesto para el corte en acero inoxidable por tecnología laser.....	132
Figura 54. Esquema para la determinación de la longitud de onda de lectura de datos.....	135
Figura 55. Datos y gráfica de la curva patrón para la determinación la concentración de la muestra problema	135
Figura 56. Espectro IR de la muestra original de 0,5 g/L	136
Figura 57. Espectro IR de la muestra después de la segunda electrocoagulación de la muestra de 0,5 g/L.....	136
Figura 58 Espectro IR de la muestra después del tratamiento con el fotorreactor de la muestra de 0,5 g/L.....	137
Figura 59. Lectura de datos en el espectrofotómetro UV-Vis	137
Figura 60. Difracción de luz láser debido a la presencia de nanopartículas de dióxido de titanio	138

Figura 61. Ausencia de difracción de luz laser luego de la precipitación del hierro.....	138
Figura 62. Piranómetro	139
Figura 63. Espectro de la radiación solar del 16 de abril a 30 de abril del 2023	140
Figura 64. Espectro de radiación solar ampliada del día 14 de abril	140

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo principal determinar las condiciones de operación favorables para la remoción del colorante textil disperso “Taicron Red” mediante el proceso combinado de electrocoagulación y catálisis solar. El diseño de la investigación fue experimental, para lo cual se construyó un equipo para tratamiento de efluentes textiles mediante electrocoagulación utilizando un panel solar, seguido del proceso de foto fenton heterogéneo en un Colector Parabólico Compuesto, diseñado para lograr una concentración solar de 2.5 veces la normal (radiación solar de 1000 W/m²). En el sistema se han tratado dos soluciones modelo con concentraciones de 1000 mg/L y 500 mg/L del colorante *Taicron Red*. Las condiciones más favorables para la primera y segunda electrocoagulación, utilizando electrodos de 720 cm² de Acero y Aluminio para el cátodo y ánodo respectivamente, fueron las siguientes: Intensidad de corriente (I), 4 Amperios; voltaje (V), 12 V; tiempo (t), 40 min y pH 7; lográndose una remoción del colorante de 90.68 % y 97.07 % según los análisis espectroscopia UV para el tratamiento foto fenton con radiación solar las condiciones más favorables se obtuvieron utilizando una solución de H₂O₂ (2 mL/kg); FeSO₄·7H₂O (100 mg/L); nanopartículas de TiO₂ (100 mg/L) a pH 7; t: 180 minutos; Temperatura de 41°C; flujo de 3 (L/min.); con este proceso se logró disminuir la Demanda Química de Oxígeno de 5216.7 a 2 050 (mg O₂/L) para la solución de 1000 mg/L y de 2341 a 1291.7 (mg O₂/L) para la solución de 500 mg/L. Respecto a la muestra industrial textil con el equipo diseñado y a las mismas mediante condiciones se obtuvo la disminución de la Demanda Química de Oxígeno de 1330 (mg O₂ /L) hasta 417 (mg O₂ /L) Se concluye que el equipo construido para tratar aguas textiles mediante electrocoagulación y catálisis solar es eficiente, ambientalmente amigable y que los parámetros de operación de los procesos fueron los más favorables, pues nos permitieron remover el color de las aguas textiles con colorantes en más de 99% y reducir la DQO hasta 75%. Desde ese contexto, la investigación representa una relevante alternativa para el adecuado tratamiento de efluentes coloreados de la industria textil.

Palabras clave: electrocoagulación, foto Fenton heterogéneo, catálisis solar, colorante textil disperso.

ABSTRACT

The main objective of this research was to determine the favorable operating conditions for the removal of the dispersed textile dye "Taicron Red" by means of the combined process of electrocoagulation and solar catalysis. The design of the research was experimental, for which a system was built for the treatment of textile effluents by electrocoagulation using a solar panel, followed by the photo-fenton process in a Composite Parabolic Collector, designed to achieve a solar concentration of 2.5 times normal (solar radiation of 1000 W/m^2). Two model solutions with concentrations of 1000 mg/L and 500 mg/L of Taicron Red dye have been treated in the system. The most favorable conditions for the first and second electrocoagulation, using 720 cm^2 electrodes of Steel and Aluminum for the cathode and anode respectively, were the following: Current Intensity (I), 4 Amps; voltage (V), 12 V; time (t), 40 min and pH 7; achieving a dye removal of 90.68 % and 97.07 % according to UV spectroscopy analysis. For the photo-fenton treatment with solar radiation, the most favorable conditions were obtained using an H_2O_2 solution (2 mL/kg); $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (100 mg/L); TiO_2 nanoparticles (100 mg/L) at pH 7; t: 180 min.; Temperature of 41°C ; flow rate of 3 (L/min.); with this process, it was possible to reduce the Chemical Oxygen Demand from 5216.7 to 2 050 (mg O_2 /L) for the 1000 mg/L solution and from 2341 to 1291.7 (mg O_2 /L) for the 500 mg/L solution. Regarding the textile industrial sample with the designed equipment and to them, through conditions, the Chemical Oxygen Demand was reduced from 1330 (mg O_2 /L) to 417 (mg O_2 /L). It is concluded that the equipment built to treat textile water by electrocoagulation and solar catalysis is efficient, environmentally friendly and that the operating parameters of the processes were the most favorable, since they allowed us to remove the color of textile waters with dyes by more than 99% and reduce COD up to 75%. From this context, the research represents a relevant alternative for the adequate treatment of colored effluents from the textile industry.

Keywords: Electrocoagulation, heterogeneous photo Fenton, photocatalysis, disperse textil dye.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación de aguas residuales generadas por la industria textil es un problema ambiental significativo, especialmente debido a la presencia de colorantes sintéticos que son difíciles de degradar mediante métodos convencionales de tratamiento. Entre estos, los colorantes dispersos, como el Taicron Red, destacan por su resistencia a la biodegradación, persistencia en el medio ambiente y su potencial para causar efectos nocivos en los ecosistemas acuáticos y la salud humana.

En este contexto, la electrocoagulación y la catálisis solar emergen como tecnologías prometedoras para la remoción eficiente de contaminantes recalcitrantes. La electrocoagulación, un proceso electroquímico, genera coagulantes in situ a partir de electrodos metálicos, facilitando la aglomeración y posterior eliminación de partículas suspendidas y solutos. Por su parte, la catálisis solar utiliza la energía solar para activar catalizadores que promueven la oxidación avanzada de compuestos orgánicos, convirtiéndolos en sustancias menos tóxicas o minerales.

Este estudio se centra en la identificación de las condiciones de operación más favorables para la remoción del colorante textil Taicron Red mediante la combinación de electrocoagulación y catálisis solar. Se exploran variables como la densidad de corriente, el pH inicial de la solución, el tiempo de reacción y la intensidad de la radiación solar, con el objetivo de optimizar el proceso y maximizar la eficiencia de eliminación del colorante. Los resultados de esta investigación contribuirán al desarrollo de métodos sostenibles y eficaces para el tratamiento de aguas residuales en la industria textil, promoviendo la reducción del impacto ambiental y la protección de los recursos hídricos.

1.1. Planteamiento del problema

A nivel mundial, uno de los grandes problemas de contaminación ambiental en los ecosistemas es la contaminación de los cuerpos de agua como consecuencia del vertimiento de los efluentes industriales sin un tratamiento previo adecuado; estas aguas residuales contienen principalmente carga orgánica carbonácea, carga orgánica nitrogenada, sólidos en suspensión, metales entre otros contaminantes. Asimismo, uno de los contaminantes acuáticos más preocupantes de cuerpos de agua lo constituyen los denominados Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs), los cuales son altamente resistentes a los tratamientos; entre ellos se encuentran los colorantes azoicos, constituidos por más de 3000 sustancias sintéticas distintas que representan alrededor del 65% del mercado mundial de colorantes (Sostenibilidad más vida, 2023). El Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico (2003) considera que la industria textil los usa, principalmente como tintes para tejidos de tipo natural, artificial y otros materiales como cuero, complementos de moda, etc. También se usan en el sector alimentario, farmacia, plásticos, cosméticos entre otros. Los colorantes azoicos liberan aminas aromáticas que son absorbidas por nuestro organismo y pueden causar graves problemas de salud.

La industria textil es un sector productivo con altos volúmenes de uso del agua y contaminación de la misma debido a que en sus procesos utiliza colorantes químicos difícilmente degradables, estos son resistentes a los tratamientos biológicos. (Medina et al., 2011)

En el Perú según el Decreto Supremo N° 20 - 2021 MINAM que aprueba el Plan de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP) para el periodo 2021-2023, considerando su aplicación para el sector textil en el artículo 9: “LMP de efluentes para las actividades de la industria de elaboración de textiles, teñidos y derivados”,

sin embargo, aún no se encuentra publicado para el control y cumplimiento de la normativa ambiental.

En este contexto, se hace necesario realizar una investigación que involucre el tratamiento de un colorante textil azoico mediante un sistema innovador y amigable con el medio ambiente.

1.2. Descripción del problema

El vertimiento de efluentes industriales en el Perú es un problema ambiental importante que afecta tanto a las aguas superficiales como subterráneas, las industrias que más contribuyen a este problema incluyen la minería, la agricultura e industria textil.

La industria textil genera efluentes acuosos provenientes de la preparación, tintura y acabados en los cuales se utiliza una gran variedad de productos químicos como tintes, blanqueadores, desinfectantes, agentes antiestáticos, entre otros, que pueden afectar la calidad del agua residual generada ya que pueden ser tóxicos, corrosivos y difícilmente biodegradables. El agua residual generada en estos procesos suele ser altamente coloreada, generalmente contienen tintes y productos químicos, metales pesados, materia orgánica, sólidos en suspensión y nutrientes, por lo tanto, urge implementar medidas de tratamiento adecuadas para reducir la contaminación del agua y cumplir con las regulaciones ambientales aplicables (López y Crespi, 2015).

Al bloquear la luz, las aguas residuales textiles agotan en gran medida el oxígeno en los cuerpos de agua, lo que provoca septicemia, que puede causar enfermedades humanas y la muerte de peces. Los tintes que ingresan a las aguas recreativas pueden ser estéticamente objetables, y la salinidad así como el pH de las aguas superficiales pueden verse alterados por las altas concentraciones de Sólidos Totales Disueltos (TDS). (Fluence News Team, s.f.).

El vertimiento de efluentes industriales textiles en Perú se encuentra regulado por el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no

domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario (Decreto Supremo N° 010-2019-Vivienda) y por la Ley de Recursos Hídricos (Ley N° 29338). Estos marcos legales establecen los requisitos de calidad ambiental para los efluentes industriales, así como los requisitos para el control y monitoreo de los vertimientos. Según el Ministerio del Ambiente (2019) el 59% de las industrias no cumplían con las normas de calidad del agua establecidas por el gobierno.

En general, las aguas residuales de la industria textil presentan un desafío para su tratamiento debido a la gran variedad de productos químicos utilizados y a la complejidad de los procesos involucrados. Por lo tanto, es importante implementar medidas de tratamiento adecuadas para reducir la contaminación del agua y cumplir con las regulaciones ambientales aplicables. Según el estudio de Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2011), ciertas industrias continúan descargando sus efluentes en cuerpos de agua superficial, como es el caso de las cuencas media y baja del río Rímac, identificadas en el informe, que señala la presencia de establecimientos industriales textiles que liberan sus efluentes en el río. Por lo tanto, existe una urgente necesidad de implementar tratamientos para las aguas residuales provenientes de la industria textil.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Cuáles deben ser las condiciones de operación favorables para la remoción del colorante textil disperso “*Taicron Red*” mediante el proceso combinado de electrocoagulación y catálisis solar?

1.3.2. Problemas específicos

¿Qué características deberá presentar el equipo de tratamiento de efluentes textiles mediante el proceso combinado de electrocoagulación y catálisis solar para la remoción del colorante textil “*Taicron Red*”?

¿Cuáles son las condiciones de operación de la remoción del colorante textil *Taicron Red* mediante los procesos de electrocoagulación y foto Fenton con el equipo diseñado?

¿Como se deberá realizar la remoción de colorantes en agua residual textil industrial utilizando el equipo de electrocoagulación y catálisis solar construido?

1.4. Antecedentes

1.4.1. Antecedentes Nacionales

Carbajal (2021) en la investigación: “Modelo de sistema de recuperación de aguas grises por fotocatalisis solar con nanopartículas de TiO_2 para riego de cultivos”, implementó un sistema fotocatalítico solar con el propósito de recuperar aguas grises para su uso en el riego de cultivos. Un fotorreactor solar programable que se basa en el PLC S7 1500 y sensores de medición en tiempo real que utilizan nanopartículas de TiO_2 como catalizador conforman este sistema. El diseño del experimento fue guiado por la metodología de superficie de respuesta (MSR). El primer experimento fue similar al diseño central compuesto (DCC) (con 20 observaciones), que fue optimizado por extensión y el último experimento fue similar a DCC (con 13 observaciones). De enero a mayo de 2020, en días soleados, se llevaron a cabo los experimentos en el tramo Huancavelica. Se realizaron análisis inductivos y deductivos de muestras de aguas grises para determinar su composición química y por tanto evaluar la calidad del agua. Los resultados mostraron dosis de nanopartículas de TiO_2 que oscilaron entre 1625 y 1875 g/L para índices UV solares muy altos (≥ 11) y tiempos de exposición a los rayos UV del catalizador solar de 75 a 105 minutos. Logramos obtener agua regenerada con un índice de

calidad de agua superior al 86%. Este resultado se mantuvo con un nivel de confianza del 95% y $\alpha = 0.05$, indicando una calidad adecuada para el riego de cultivos según ICA-PE.

Díaz (2021) en su tesis “Tratamiento de aguas residuales de la industria textil mediante procesos de oxidación avanzada ($O_3/UV/H_2O_2$) para su vertimiento en la red de alcantarillado” investigó la reducción de materia orgánica (DBO_5) en aguas residuales textiles utilizando la tecnología del Proceso de Oxidación Avanzada (AOP). Se han aplicado tratamientos químicos como ozono (O_3), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y luz ultravioleta (UV) en los reactores de Proceso de Oxidación Avanzada secuenciales. Se ajustaron el pH, la concentración de peróxido y el tiempo de exposición a los rayos UV del efluente, mientras se mantuvo un flujo de ozono constante (100%). El tratamiento con proceso de oxidación avanzada (AOP) disminuyó la demanda biológica de oxígeno (DBO_5) en alrededor del 34,81 %, según la especificación inicial de 108 mg/L DBO_5 . Se descubrió que el tratamiento óptimo se logra con 300 minutos de exposición a los rayos UV y 100 % de ozonización con un pH de 8,5. Un modelo cinético para la degradación de aguas residuales de fibras sintéticas en condiciones ideales de operación también se ha creado. El modelo se utilizó para la cinética de primer orden, según los datos de DBO_5 . Las constantes de velocidad orgánica de oxidación (DBO_5) fueron de 9,5. Las concentraciones finales de los parámetros de emisión (DBO_5 , DQO y pH) se comparan con las regulaciones del Reglamento de Límites Admisibles (D.S. 003-2002-PRODUCE) y los Valores Máximos Admisibles. La muestra VIVIENDA no pudo ser descargada al alcantarillado debido a que no cumplió con ambos requisitos de DQO (VMA D.S. N° 021 - 2009).

Aquino (2017) en la investigación: “Tratamiento de aguas residuales de la industria textil artesanal por fotocátalisis homogénea y heterogénea”, se centró en abordar un efluente textil artesanal mediante fotocátalisis, tanto homogénea como heterogénea. Se utilizó un efluente simulado con elevados niveles de contaminación, compuesto por 0,02 g/L de colorante anilina y 0,57 g/L de biftalato de potasio, con un DQO de 998,71 ppm y 1985 JIS°. El efluente

real, con un DQO de 1055,22 mg/L, 1952 de color y un pH de 3,84, fue analizado en el Laboratorio SGS del Perú SAC. Se utilizaron 25 litros de efluente durante el experimento simulado para cada módulo a un pH de 3, considerando tres variables de dos niveles: radiación solar (sol y nubes), tiempo de tratamiento (2 a 4 horas) y tipo de fotocatalisis (heterogénea y homogénea). Se utilizaron 0,02 mg/L para una fotocatalisis homogénea de sulfato ferroso heptahidratado y 2 g/L de H₂O₂, mientras que para la heterogénea se emplearon 200 g/L de colorante, 0,25 mg/L de TiO₂ y 1 g/L de H₂O₂. El proceso de tratamiento consistió en alimentar el efluente simulado al módulo, energizar la bomba y, después de 2 ó 4 horas, se tomaron muestras del efluente para su análisis. Los resultados revelaron que tanto la fotocatalisis homogénea como la heterogénea lograron una degradación promedio de DQO y el color del efluente del 86,20% y 57,14%, y 93,02% y 66,62%, respectivamente, en un tiempo de tratamiento de 4 horas. Se concluyó que la fotocatalisis es una técnica efectiva para tratar el efluente textil artesanal, siendo ambas modalidades eficaces en su tratamiento. No obstante, la fotocatalisis homogénea demostró una mayor eficiencia en la degradación de DQO y del color. Además, se sugiere que, para lograr una mayor degradación, especialmente en la fotocatalisis heterogénea, se debe aumentar el tiempo de tratamiento.

Bermeo (2017) en la investigación “Remoción eficiente de colorante refractario azul MNO reactivo en combinación con vinil sulfónico en aguas residuales mediante técnicas de electrocoagulación y adsorción”, se enfocó en la reducción de los niveles de vinil sulfónico, un compuesto utilizado en la tintura de algodón y fibras celulósicas, mediante la aplicación de la electrocoagulación y el carbón activado en efluentes textiles. El objetivo principal fue abordar la eliminación de color y la demanda química de oxígeno (DQO) en efluentes textiles con características específicas, como un pH de 8.93, color de 3500 unidades Pt/Co, DQO de 1300 mg/L, demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de 177 mg/L y turbidez de 137 NTU. Se emplearon electrodos de hierro con diversas configuraciones de celdas y paquetes, variando

amperajes, voltajes y tiempos de reacción. Este enfoque permitió lograr una remoción del 97,54% de la DQO y del 99,11% del color durante el proceso de electrocoagulación. Adicionalmente, se implementó un sistema de adsorción con carbón activado, logrando una remoción adicional del 97,95% para la DQO y del 99,20% para el color.

Deza (2017) en la investigación: “Estudio de catalizadores basados en nanopartículas de TiO_2 para la degradación fotocatalítica del colorante cibacrón navy H-2G presente en efluentes textiles”, realizó un estudio con el propósito de evaluar la eficacia de catalizadores que emplean nanopartículas de TiO_2 en la degradación fotocatalítica del colorante Cibacrón Navy H-2G. El objetivo central fue analizar la capacidad de los catalizadores basados en TiO_2 para degradar este compuesto orgánico. Se emplearon dos tipos de nanopartículas de TiO_2 : Degussa P25, una nanopartícula comercial, y Avanzare, una nanopartícula industrial. Los catalizadores se prepararon mediante un procedimiento de impregnación en tres sustratos distintos: láminas de vidrio, PET y PVC. La evaluación de la degradación del colorante se llevó a cabo midiendo el porcentaje de decoloración con un equipo medidor de COT. Los resultados destacan que todos los catalizadores lograron una decoloración total del colorante Cibacrón Navy H-2G, siendo el catalizador con TiO_2 Avanzare el más eficaz con una degradación del 77.8%, seguido por el catalizador con TiO_2 Degussa P25 con una degradación del 52.8%. Además, los resultados de las pruebas de reúso indicaron que los catalizadores podrían ser utilizados en tres ensayos consecutivos manteniendo resultados óptimos. Este estudio sugiere que los catalizadores basados en TiO_2 son efectivos para la degradación del colorante Cibacrón Navy H-2G, proponiéndose como una solución viable para eliminar este compuesto orgánico del agua.

1.4.2. Antecedentes Internacionales

Dalvi et al. (2023) en la investigación “Hybrid electrocoagulation and laccase mediated treatment for efficient decolorization of effluent generated from textile industries”(Tratamiento

híbrido mediado por electrocoagulación y lacasa para la decoloración eficaz de efluentes generados por industrias textiles), analizaron la eliminación de colorantes mediante procesos enzimáticos, la cual sigue siendo poco eficiente para los colorantes resistentes, los que pueden ser tratados de manera más efectiva a través de la electrocoagulación (EC). Sin embargo, la EC consume mucha energía y genera una gran cantidad de residuos sólidos. En vista de esto, el estudio actual propone una solución prometedora para tratar los efluentes textiles de acuerdo con las normativas de vertido en la superficie, mediante la combinación de tratamientos enzimáticos y de electrocoagulación. Los resultados indican que la mejor eliminación del color (90%) en efluentes textiles sin diluir (4592 unidades Hazen) se logra utilizando EC con un electrodo de hierro recubierto de zinc a una densidad de corriente de 25 mA/cm², seguido de un tratamiento con la casa parcialmente purificada (LT) y una pulitura con carbón activado (AC) en condiciones ambientales.

Asfaha et al. (2022) en la investigación “Application of hybrid electrocoagulation and electrooxidation process for treatment of wastewater from the cotton textile industry” (Aplicación de un proceso híbrido de electrocoagulación y electrooxidación para el tratamiento de las aguas residuales de la industria textil del algodón), presentan una evaluación del proceso híbrido de electrocoagulación-electrooxidación (EC-EO) para determinar su eficacia en la eliminación de color, carbono orgánico total (TOC) y demanda química de oxígeno (COD). En este estudio, optaron por usar electrodos de aluminio (Al/Al) y electrodos recubiertos con dióxido de iridio sobre titanio (IrO₂/Ti) como ánodo y cátodo, respectivamente, para llevar a cabo los experimentos de EC y EC-EO. Se aplicó un diseño experimental estadístico de Box-Behnken para optimizar diversas condiciones operativas de ambos procesos. En el caso de la EC, se ajustaron parámetros como la concentración de tinte, la densidad de corriente aplicada, el tiempo de electrólisis y el pH. Por otro lado, en el proceso híbrido EC-EO, se enfocaron en la densidad de corriente aplicada, el pH y el tiempo de electrólisis. La evaluación de los

resultados se basó en los efectos de interacción entre los parámetros operativos en la eliminación de DQO, TOC y color. Los resultados indicaron que el proceso de EC logró eliminar el 89% del color y el 76% de la DQO en las condiciones óptimas. De manera similar, el proceso híbrido EC-EO logró una eficiencia del 97% en la eliminación de DQO y color. Para analizar la extensión de la degradación de los tintes, se empleó una combinación de espectroscopia FT-IR y espectroscopia NMR de ^1H y ^{13}C . Ambos análisis confirmaron la completa degradación de los contaminantes orgánicos en dióxido de carbono y agua, se comprobó que las condiciones óptimas de operación funcionaron bien en efluentes industriales reales, demostrando un excelente rendimiento en la eliminación de contaminantes.

Contreras (2022) en un estudio titulado "Degradación de colorantes en aguas residuales utilizando minerales de óxido de hierro natural como catalizadores", investigó el uso de materiales de óxido de hierro natural producidos en Aserias de Paz del Río, Boyacá, Colombia. Utilizado como catalizador en el proceso Fenton. Este proceso de oxidación avanzado utiliza sales de hierro solubles (Fe^{+2}) en presencia de H_2O_2 a pH ácido. Este material se caracterizó mediante diversos métodos para revelar su baja área superficial ($27 \text{ m}^2/\text{g}$), diferentes fases de hierro como siderita, goetita y hematita, así como su composición elemental principal de hierro y oxígeno. En pruebas de actividad catalítica, se observó que este material reducía el cristal violeta (CV) en un 90 % y la fucsina ácida (FA) en un 80 % en 8 horas a una concentración inicial de contaminante de 50 mg//. hora. En ambos casos, 1. El carbono orgánico total (COT) también disminuyó un 34% en CV y un 36% en FA. En el ciclo de reutilización, el TOC disminuyó al 46 % y 51 % después del primer ciclo de CV y FA, respectivamente. Estaba claro que la cantidad de hierro que entraba en la solución era de 6 mg/l, lo que indicaba que el proceso catalítico era heterogéneo. Este estudio demuestra el potencial de este material como catalizador eficaz para la degradación de tintes textiles en aguas residuales.

Shams et al. (2021) en la investigación: “Coupling electrocoagulation and solar photocatalysis for electro- and photo-catalytic removal of carmoisine by Ag/graphitic carbon nitride: Optimization by process modeling and kinetic studies” para la eliminación electro y fotocatalítica de carmoisina mediante Ag/nitruro de carbono grafitico: Optimización mediante modelización del proceso y estudios cinéticos, discuten el uso de una técnica de tratamiento de agua llamada electrocoagulación (EC) combinada con fotocátalisis, utilizando el compuesto C_3N_4 dopado con Ag, para la eliminación del colorante azo carmoisina. La técnica de electrocoagulación es un proceso de tratamiento de agua en el cual utilizan electrodos de metales (como hierro o aluminio) para generar iones hidroxilo y iones metal en una solución acuosa. Estos iones son capaces de coagular y flocular las partículas en suspensión y, al mismo tiempo, oxidar compuestos orgánicos y reducir compuestos inorgánicos. En este caso específico, utilizó electrodos de hierro-hierro y aluminio-aluminio para comparar su eficacia en la eliminación del colorante azo carmoisina. Encontró que los electrodos de hierro-hierro mostraron una eficiencia de eliminación superior del 37% en comparación con los electrodos de aluminio-aluminio (23%). La combinación de estas dos técnicas, electrocoagulación y fotocátalisis ha demostrado ser un enfoque eficiente y prometedor para la eliminación de tintes en aplicaciones de remediación ambiental, ya que juntos pueden aprovechar las ventajas de cada uno, logrando una mayor eficiencia en la eliminación de contaminantes orgánicos.

Bener et al. (2019) en la investigación “Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: Effect of operative conditions on the organic carbon removal and kinetic study” Las aguas residuales textiles reales tratadas in situ fueron sometidas a electrocoagulación para su reutilización en riego agrícola. El efecto de varios parámetros como el tipo de electrodo (Al y Fe), la densidad de corriente (12,5–100 mA/cm²), el pH inicial (5 – 10) y el tiempo de electrocoagulación (0-120 min) investigaron para determinar la condición óptima de electrocoagulación. Para todos los experimentos se utilizaron electrodos

monoplares conectados en paralelo. El rendimiento de los experimentos se evaluó principalmente mediante la eliminación de carbono orgánico total (TOC). Como condiciones óptimas se seleccionó el electrodo de Al, 25 mA/cm² de densidad de corriente y un pH=5. En estas condiciones se lograron 42,5 % de TOC, 18,6 % de demanda química de oxígeno (DQO), 83,5 % de turbidez, 64,7 % del total de sólidos suspendidos y 90,3–94,9 % de eficiencias de eliminación de color. El costo de operación se calculó considerando el consumo de energía y electrodos y se evaluó como 1,5 \$/m³ de agua residual tratada. La reacción de electrocoagulación siguió la cinética de reacción de segundo orden.

Bilinska et al. (2019) en la investigación “Coupling of electrocoagulation and ozone treatment for textile wastewater reuse”, presentan los beneficios derivados de la combinación de dos procesos de tratamiento: la electrocoagulación (EC) y la ozonización (O₃). Estos procesos pueden ser aplicados como una operación conjunta (EC+O₃) o en dos pasos secuenciales (EC→O₃). La sinergia entre la EC y la O₃, ambas reconocidas por su eficacia en ambientes con alto contenido salino, ha demostrado ser altamente efectiva, tanto en soluciones acuosas de laboratorio como en aguas residuales textiles industriales reales que contienen el colorante Negro Reactivo 5 (RB₅). Los resultados de estos procesos combinados han sido notables, especialmente en términos de eliminación de color. Se ha logrado eliminar más del 95% del color en un tiempo de tratamiento sorprendentemente breve, en menos de 18 minutos, en contraste con los aproximadamente 60 minutos requeridos al emplear solo ozonización. Además, esta combinación ha permitido reducir de manera significativa la cantidad de ozono necesaria, disminuyendo la dosis de 1.69 g/L (cuando se utiliza O₃ en solitario) a menos de 0.3 g/L en el caso del proceso EC→O₃, lo que implica una optimización coste-efectiva. Aunque tanto EC+O₃ como EC→O₃ han demostrado ser altamente eficientes en la eliminación de color y mineralización, la evaluación económica sugiere que la estrategia EC→O₃ es la opción más ventajosa. Es importante destacar que, cuando se aplica la EC como tratamiento único, se

observa un incremento en la toxicidad del efluente, pero esta tendencia indeseable se revierte cuando se combina la EC con la O_3 . Además, los ensayos de reciclaje han arrojado resultados prometedores. La diferencia de color (DEC_{mc}, según ISO 105-J03) en textiles tratados con aguas residuales tratadas y purificadas (salmuera) oscila entre 0,28 y 0,98, situándose por debajo del valor límite de 1,5, lo que apunta a la viabilidad del reciclaje de aguas. residuos en la industria textil.

Suárez et al. (2016) en la investigación: “Electrocoagulation - Photocatalytic process for the treatment of lithographic wastewater. Optimization using response surface methodology (RSM) and kinetic study”, desarrollaron un proceso combinado de electrocoagulación y fotocátalisis para tratar aguas residuales litográficas con el objetivo de remover el carbono orgánico total (TOC) presente en las aguas. Utilizó una metodología de superficie de respuesta para optimizar las variables del proceso, como la densidad de corriente para el proceso de electrocoagulación, la concentración de TiO_2 para el proceso fotocatalítico y el pH en ambos casos. Logró una remoción del 65% mediante el proceso electroquímico en 30 minutos y una eliminación del 25% de TOC residual mediante el proceso fotocatalítico, para un total de 74% de remoción de TOC del valor inicial. Realizó un modelado cinético para ambos procesos utilizando ecuaciones de pseudo segundo orden. El agua tratada alcanzó los estándares requeridos y se considera apta para limpieza en el proceso litográfico.

Bermeo y Tinoco (2016) en su estudio titulado “Remoción de colorantes de efluente sintético de industria textil aplicando tecnología avanzada de electrocoagulación” investigaron el uso de materiales de óxido de hierro natural producidos en Aserías de Paz del Río, Boyacá, Colombia. Utilizado como catalizador en el proceso Fenton. Este proceso de oxidación avanzado utiliza sales de hierro solubles (Fe^{+2}) en presencia de H_2O_2 a pH ácido. Este material se caracterizó mediante diversos métodos para revelar su baja área superficial ($27\text{ m}^2/\text{g}$), diferentes fases de hierro como siderita, goetita y hematita, así como su composición elemental

principal de hierro y oxígeno. En pruebas de actividad catalítica, se observó que este material reducía el cristal violeta (CV) en un 90 % y la fucsina ácida (FA) en un 80 % en 8 horas a una concentración inicial de contaminante de 50 mg/L. hora. En ambos casos, el carbono orgánico total (COT) también disminuyó un 34% en CV y un 36% en FA. En el ciclo de reutilización, el TOC disminuyó al 46 % y 51 % después del primer ciclo de CV y FA, respectivamente. Estaba claro que la cantidad de hierro que entraba en la solución era de 6 mg/L, lo que indicaba que el proceso catalítico era heterogéneo. Este estudio demuestra el potencial de este material como catalizador eficaz para la degradación de tintes textiles en aguas residuales.

Manenti et al. (2014) en la investigación: “Assessment of a multistage system based on electrocoagulation, solar photo-Fenton and biological oxidation processes for real textile wastewater treatment”, analizaron el rendimiento de un sistema de tratamiento de aguas residuales textiles de múltiples etapas mediante electrocoagulación (EC), fotooxidación-Fenton y biodegradación de lodos activados. El objetivo principal fue evaluar el desempeño del sistema en términos de reducción de la demanda química de oxígeno (DQO). En la primera etapa del sistema, se utilizó EC para tratar las aguas residuales. Esto indica que el tratamiento basado en AE es adecuado como primer paso en un sistema de tratamiento integrado, reduciendo la DQO en un 36%. En la segunda etapa del sistema, se utilizó un fotorreactor de laboratorio para evaluar el efecto de los parámetros del fotoFenton en el rendimiento del proceso. Establecieron las condiciones de la reacción de Photo-Fenton en 100 mg Fe₂/L, pH 2,8, 12 mM H₂O₂ y energía de almacenamiento de 6,9 kJ/L. En este caso se consiguió una biodegradación del 70%. En la tercera etapa se utilizó un reactor biológico a escala de laboratorio a base de lodos activados para alcanzar los límites legales de vertido a cuerpos de agua. Se alcanzó una DQO residual de 139 mg O₂/ L a la salida del proceso biológico, inferior al límite máximo establecido por la legislación portuguesa. En conclusión, el sistema de

tratamiento integrado logró una reducción significativa de la DQO mediante una combinación de electrocoagulación, fotooxidación Fenton y biodegradación de lodos activados.

Boroski et al. (2009) en la investigación: “Combined electrocoagulation and TiO₂ photoassisted treatment applied to wastewater effluents from pharmaceutical and cosmetic industries”, muestran que el agua residual proveniente de una fábrica farmacéutica presenta materiales refractarios y un alto contenido orgánico de residuos de peptona hidrolizada, reflejado en un elevado nivel de Demanda Química de Oxígeno (DQO) en la muestra inicial. Con el fin de maximizar la eficacia del tratamiento, se empleó una combinación de electrocoagulación (EC) seguida de fotocátalisis heterogénea (TiO₂). La EC se llevó a cabo utilizando un cátodo/ánodo de hierro (12,50 cm × 2,50 cm × 0,10 cm), con una densidad de corriente de 763 Am⁻², durante 90 minutos y con un pH inicial de 6,0. La DQO se utilizó como indicador del contenido orgánico del agua, buscando reducirlo al máximo para obtener un agua limpia y segura para su reutilización o descarga. La EC logró una reducción significativa de la DQO, disminuyendo de 1753 mg/L en la muestra inicial a 160 mg/L después del tratamiento con EC. A pesar de ello, persistían residuos refractarios en el efluente. La fotocátalisis posterior con UV/TiO₂/H₂O₂ se llevó a cabo utilizando lámparas de mercurio, con un pH de 3,0, 4 horas de irradiación, 0,25 g/L de TiO₂ y 10 mmol/L de H₂O₂. Esta técnica demostró altos niveles de eliminación de compuestos inorgánicos y orgánicos, reduciendo significativamente la DQO del agua tratada. El valor de DQO obtenido tras el tratamiento combinado de EC y fotocátalisis fue de 50 mg/L, indicando una eficaz potabilización del agua. En conclusión, la combinación de EC seguida de fotocátalisis heterogénea (TiO₂) se revela como una técnica eficaz para tratar el agua residual de una fábrica farmacéutica, logrando una considerable reducción de la DQO y cumpliendo con los estándares de calidad del agua.

1.5. Justificación de la investigación

La presente investigación se justifica considerando en nuestro país, la normativa ambiental es cada vez más exigentes en la industria textil; asimismo, teniendo en cuenta el aumento constante de la producción textil y por ende la mayor cantidad de aguas residuales que contienen colorantes de alta estabilidad química, es necesario proponer tratamientos eficientes. Por otro lado, esta investigación ha permitido desarrollar una tecnología capaz de degradar un colorante disperso que se encuentra dentro de los colorantes más estables a la radiación solar visible, utilizando una tecnología amigable con el ambiente pues utiliza energía solar directa con la ayuda de un Colector Parabólico Compuesto (CPC), para activar la destrucción de los componentes del colorante y transformándola en energía eléctrica para su utilización en los procesos de bombeo, agitación y electrocoagulación.

El sistema de tratamiento aplicado cuenta con una tecnología desarrollada de electrocoagulación y radiación solar dentro del espectro visible en un reactor catalítico, es de bajo costo debido a que toda la energía utilizada en el proceso de tratamiento proviene de la radiación solar, lo que permitiría su implementación aún en pequeñas plantas de teñido. Para el diseño y construcción se ha tenido en cuenta los criterios de novedad inventiva y nivel técnico del equipo con el fin de lograr un registro de patente en INDECOPI.

Asimismo, desde el punto de vista teórico se ha aplicado la cinética química para estimar la velocidad de degradación del colorante disperso “*Taicron Red*” mediante la radiación solar y el uso de catalizador dióxido de titanio, lo cual permite conocer el proceso para implementarlo para otros colorantes de la industria textil.

1.6. Limitaciones de la investigación

La principal limitación de la investigación fue contrastar los resultados de laboratorio con muestras reales, debido a que solo se efectuó el proceso con la muestra de una sola empresa textil la que colaboró facilitando la toma de muestra en apoyo a la investigación para el control

de la contaminación. No fue así con otras empresas que no facilitaron sus muestras de efluentes posiblemente por no cumplir con la normativa vigente en salvaguarda de la fiscalización ambiental.

1.7. Objetivos de la investigación

1.7.1. Objetivo general

- Determinar las condiciones de operación favorables para la remoción del colorante textil disperso “*Taicron Red*” mediante el proceso combinado de electrocoagulación y catálisis solar.

1.7.2. Objetivos específicos

- Construir un equipo de tratamiento de efluentes textiles mediante el proceso combinado de electrocoagulación y catálisis solar para la remoción del colorante textil “*Taicron Red*”, utilizando una fuente de energía renovable.
- Determinar las condiciones de operación del proceso de electrocoagulación y catálisis solar en soluciones de colorante textil “*Taicron Red*” para la remoción del color y la demanda química de oxígeno.
- Analizar la remoción de colorantes en agua residual textil industrial utilizando el equipo de electrocoagulación y catálisis solar diseñado.

1.8. Hipótesis

1.8.1. Hipótesis general

- Las condiciones de operación desarrolladas en este proceso permiten remover el colorante textil disperso “*Taicron Red*” y el colorante de un agua residual industrial utilizando el proceso combinado de electrocoagulación y catálisis solar.

1.8.2. *Hipótesis específicas*

- Las características del diseño y construcción del equipo de tratamiento de efluentes textiles mediante el proceso combinado de electrocoagulación y catálisis solar permitirán la remoción del colorante textil “*Taicron Red*”
- Se logra una remoción eficiente del color y la demanda química de oxígeno en soluciones de colorante textil “*Taicron Red*” mediante los procesos de electrocoagulación y catálisis solar en el equipo diseñado
- Es posible remover el color y la carga orgánica de un agua residual textil proveniente de la industria mediante los procesos de electrocoagulación y foto Fenton en un reactor solar con las condiciones de operación establecidas para el colorante textil *Taicron Red*.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Remoción del colorante textil

La remoción de sustancias químicas se refiere al proceso de eliminar o reducir la presencia de ciertas sustancias químicas de un medio específico, como el agua, el aire o el suelo. Este proceso puede llevarse a cabo mediante diversos métodos y tecnologías diseñadas para separar, degradar o transformar las sustancias químicas no deseadas. La remoción de estas sustancias puede ser crucial para prevenir la contaminación ambiental y proteger la salud humana y la biodiversidad. Los residuos textiles industriales imparten una coloración significativa al agua en la corriente receptora; sólo una pequeña proporción de color es importante porque los elementos líquidos están contaminados, causando problemas estéticos, de salud y ambientales acuáticos por la limitada penetración de luz (Calderon y Olortico, 2019).

2.1.1. *Colorantes textiles*

Los colorantes son utilizados en la industria textil para dar color a las telas y productos textiles, existen diferentes tipos como los naturales, sintéticos y orgánicos. Los colorantes naturales son obtenidos a partir de plantas y animales, mientras que los sintéticos son elaborados a partir de compuestos químicos y los orgánicos son obtenidos a partir de compuestos orgánicos (Campos, 2017).

Los colorantes sintéticos son los más utilizados en la industria textil debido a su gran estabilidad y resistencia a los procesos de lavado y planchado. Sin embargo, estos colorantes también pueden ser dañinos para el medio ambiente y la salud humana si no se manejan adecuadamente. Por otro lado, los colorantes refractarios son aquellos que son resistentes a altas temperaturas y a ciertos procesos químicos, lo que los hace ideales para su uso en aplicaciones industriales, como la tintura de textiles y la fabricación de productos químicos y alimentarios. Estos colorantes suelen ser más estables que los colorantes convencionales y pueden ser utilizados en condiciones de alta presión y temperatura (Zaruma et al., 2018).

Clasificación de los colorantes textiles

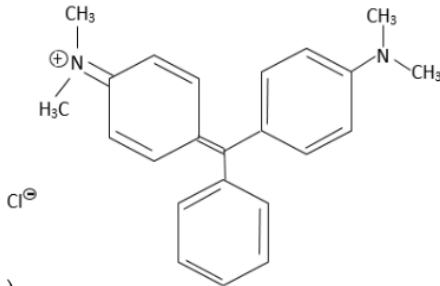
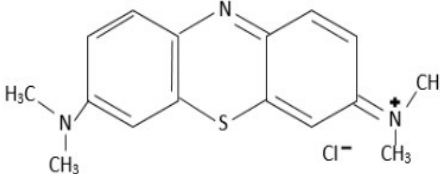
Con su adhesión química al material en el que se aplican, los colorantes son sustancias orgánicas complejas que absorben la luz y producen color en el espectro visible. Se clasifican según su estructura química o su carga iónica.

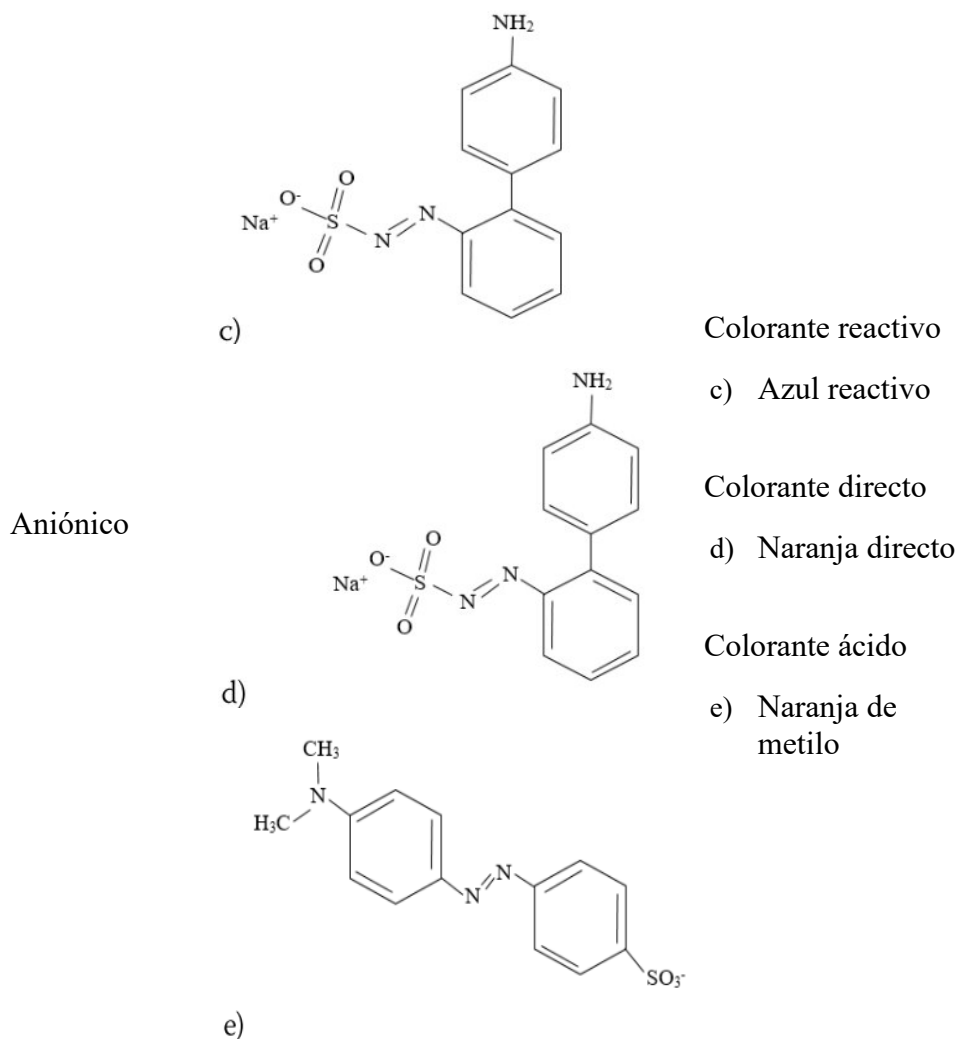
Los colorantes iónicos se emplean principalmente en la industria textil por su amplia gama de colores, su alta solubilidad en agua y su afinidad con varios tipos de fibras. Los colorantes iónicos son catiónicos y aniónicos que tienen el grupo funcional sulfonato ($-\text{SO}_3^-$), los que son muy solubles en agua y tienen afinidad con los textiles. Son tres subgrupos de colorantes aniónicos, reactivos, directos y ácidos, la presencia de uno o más grupos funcionales ácidos (HSO_3^- y COOH^-) es una característica de los colorantes ácidos. (Gallego y Rubio, 2022)

En la Tabla 1 se muestran algunos ejemplos de colorantes basados en la clasificación de colorantes por su carga iónica.

Tabla 1

Clasificación de colorantes en base a la carga iónica

Carga Iónica	Estructura del colorante	Descripción
Catiónico		a) Verde de malaquita
		b) Azul de metileno



Fuente: Basado en (Gallego y Rubio, 2022)

La insolubilización, la formación de soluciones sólidas, la formación de enlaces salinos y covalentes y la formación de puentes de hidrógeno corresponden a los mecanismos de transferencia y adhesión. Los colorantes pueden ser, según la clasificación tintórea:

A. Colorantes dispersos

Se trata de sustancias que son poco solubles en agua, pero que son solubles en disolventes orgánicos y/o fibras sintéticas apolares. Se aplican a partir de una suspensión acuosa, casi coloidal, utilizando un agente dispersante (normalmente un jabón llamado portador de tinte); las fibras extraen el tinte de la dispersión y forman una solución sólida (Marcano, 2018).

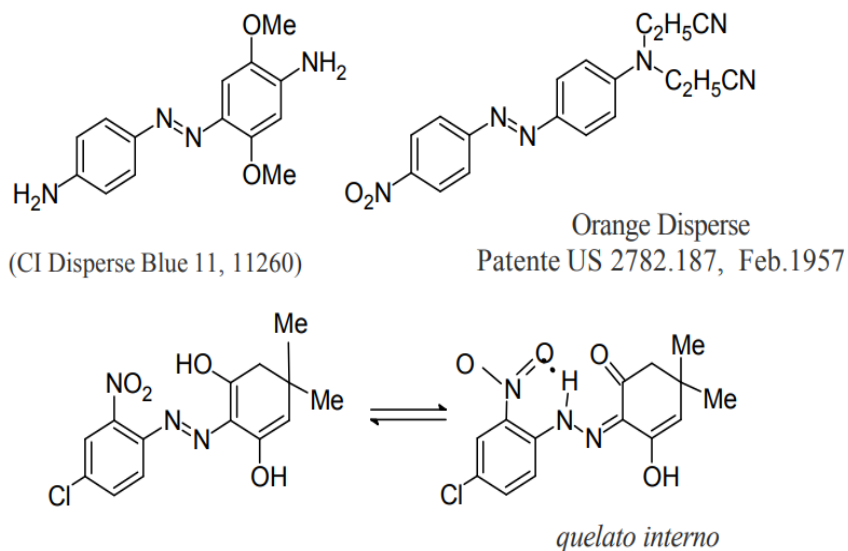
B. Colorantes dispersos AZO

Tienen baja solubilidad en agua y son adecuados para fibras hidrófobas. Entre los tintes utilizados, los azos representan casi la mitad de la producción, mientras que las antraquinonas son otra de las sustancias químicas importantes en la composición de este color. Se utilizan para poliéster, acetato de celulosa y nailon porque tapan bien las manchas con telas no tejidas llamadas barreras (barras o rayas en la tela). Estructura química derivada del aminoazobenceno que contiene un grupo OMe, alquilo, CN, NO₂ o Cl, en la posición paradisiaca relacionada con la función diazo. Si hay NO₂, CN, grupo orto diazo, el tinte se vuelve más fuerte con la luz, debido a la formación de quelatos en su interior. Los grupos N-β-cianoetilo inducen la estabilidad a la luz y a la sublimación (Pacheco, 2018).

En la Figura 1 podemos observar la estructura química de antrarrufina y crisazina.

Figura 1

Estructura química de antrarrufina y crisazina



C. Colorantes Antraquinona

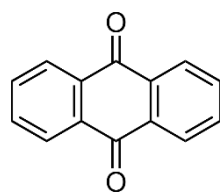
Una característica estructural común es la presencia de uno o más grupos cetona unidos al sistema conjugado, que luego contienen sustituyentes conjugados al grupo carbonilo, como grupos hidroxilo y/o amino, así como halógeno, azufre, etc.

Las antraquinonas simples se pueden utilizar como colorantes o como materiales de partida para la síntesis de moléculas cromogénicas más complejas. Este grupo también incluye estructuras heterocíclicas conjugadas con fragmentos de antraquinona, como acridonas, tioxantonas.

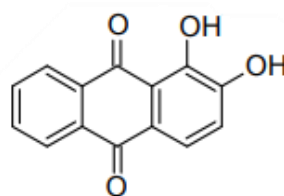
En la Figura 2 se observa la estructura química de una antraquinona y de una alizarina.

Figura 2

Estructura química de una antraquinona y algunos tintes derivados



Antraquinona



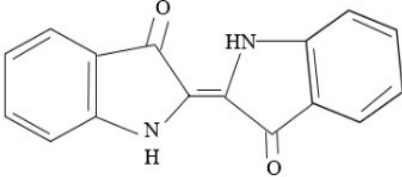
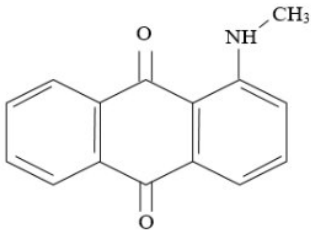
Alizarina
CI Mordant Red 11, 58000

Fuente: Datos extraídos “*Introducción a la química de los colorantes*” (2018)

Los colorantes no iónicos se dividen en colorantes dispersos y colorantes para platos. El primero es soluble en agua caliente o en presencia de una pequeña cantidad de carbonato de sodio (Na_2CO_3), mientras que el segundo es insoluble o ligeramente soluble en agua y se utiliza para fibras hidrofóbicas (Gallego y Rubio, 2022).

En la Tabla 2 se muestran algunos ejemplos de colorantes basados en la clasificación de colorantes por su solubilidad.

Tabla 2*Clasificación de colorantes en base a la solubilidad*

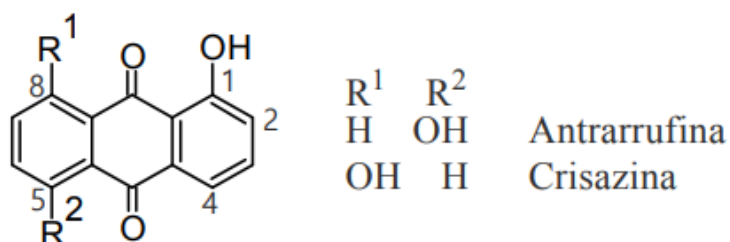
Solubilidad	Estructura del colorante	Descripción
Soluble en agua caliente		Colorante de tina I. Índigo sintético
Insolubles o moderadamente solubles en agua		Colorante disperso II. Rojo disperso 9

Fuente: Basado en (Gallego y Rubio, 2022)

a.1. Colorante Taicron Red E-ACT:

Este colorante pertenece al grupo Antraquinona, Azo disperso, según su ficha técnica, presenta baja solubilidad en agua entre otras propiedades químicas y físicas que se detallan en el (Anexo H), ejemplos de algunos colorantes del grupo de Antraquinona como la Antrarrufina y Crisazina.

En la Figura 3 se observa la estructura química de la Antrarrufina y Crisazina.

Figura 3*Estructura química de la Antrarrufina y Crisazina*

2.1.1.1. Impactos ambientales de los colorantes textiles

Los colorantes sintéticos son ampliamente utilizados en varias industrias, incluyendo textil, papelera, cosmética y farmacéutica. Sin embargo, estos compuestos pueden ser considerados como contaminantes persistentes debido a que no pueden ser removidos con los métodos convencionales de tratamiento de aguas y pueden ser liberados en las aguas residuales. Estos compuestos están compuestos por grupos cromóforos, como azo, carbonilo, metilo, nitro y quinoides, que son responsables del color. Se ha demostrado que algunos colorantes azo pueden ser carcinogénicos y mutagénicos, y sus productos de degradación pueden ser aún más tóxicos. La toxicidad de los colorantes ha sido evaluada utilizando bioindicadores como *Daphnia magna*, *Salmonella thyphimurium* y peces, así como en ensayos en ratas y monitoreos biológicos en trabajadores de la industria textil (Cortazar et al., 2012).

La industria textil utiliza un gran número de colorantes sintéticos, siendo el grupo de los colorantes azo los más utilizados, representando alrededor del 30% de la producción total. Sin embargo, el proceso de fijación de estos colorantes requiere un gran consumo de agua, y se estima que hasta un 50% de los colorantes utilizados en la industria textil terminan en las aguas descargadas debido a su bajo grado de fijación en las telas. Es importante señalar que la gestión de los residuos de colorantes y su tratamiento es fundamental para minimizar los impactos ambientales y de salud humana, y es necesario desarrollar nuevas tecnologías para su eliminación y reciclaje (Zaruma et al., 2018).

En la Tabla 3 se observa el porcentaje de colorante no aprovechado y que va directamente a los efluentes. Factores que intervienen en la fotocatalisis.

Tabla 3*Porcentaje de aprovechamiento de los colorantes según tipos de fibras*

Método de aplicación	Tipo de fibra	Grado de fijación (%)	Descarga en efluentes (%)
ácido	poliamida	85-95	5-15
básico	acrílico	95-100	0-5
directo	celulosa	70-95	5-30
disperso	poliéster	90-100	0-10
reactivo	celulosa	50-90	10-50
sulfuro	celulosa	60-90	10-40
tina	celulosa	80-95	5-20

Fuente: Adaptado de Zaruma et al. (2018)

2.1.2. Métodos de tratamientos para los efluentes de colorantes textiles

Los métodos más comúnmente utilizados para tratar las aguas residuales contaminadas con colorantes en la industria textil incluyen filtración por membrana, procesos fotoquímicos y tecnologías específicas, como la lixiviación y la adsorción. Aunque estos métodos son eficientes, pueden tener altos costos y no siempre son aplicables para una amplia variedad de colorantes (Cortazar et al., 2012).

En la Tabla 4 se presenta los métodos convencionales para el tratamiento de aguas residuales que contienen colorantes textiles.

Tabla 4*Métodos para el tratamiento de efluentes textiles*

Tipo de método	Método	Ventajas	Desventajas
Físico	Adsorción	Remueve eficientemente varios colorantes. Es económica.	Algunos materiales utilizados son costosos y se pierde en la regeneración.
	Filtración por membrana	Remueve colorantes en bajas concentraciones. Resistente a temperatura y ataques microbianos.	Altos costos. Ineficiente para remover sólidos disueltos.

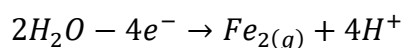
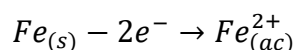
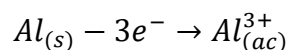
Químico	Intercambio iónico	Efectivo para remover colorantes catiónicos y aniónicos. Poca pérdida en regeneración.	Solventes orgánicos utilizados son caros. Aplicaciones específicas.
	Electroquímico	Eficiente remoción de colorantes y degradación de contaminantes sin subproductos tóxicos.	Costos de electricidad son altos.
	Oxidación	Método comúnmente usado para romper anillos aromáticos. Efectivo en tratamiento de aguas resistentes a tratamiento biológico.	Genera lodos. Reactivo de Fenton tiene costos elevados.
	Fotoquímico	Degrada moléculas orgánicas en CO ₂ y agua. No genera lodos.	Puede generar subproductos tóxicos. Altos costos.
Biológico	Coagulación	Buena eficiencia de remoción. Bajos costos de inversión.	Resultados pobres con colorantes ácidos. Alto costo de disposición de lodos.
	Bio absorción	Absorbe y remueve colorantes. Puede ir acompañado de biodegradación.	Aún en etapa de investigación. Problemas de disposición de biomasa con colorantes.
	Bio degradación	Microorganismos aislados con capacidad de degradar diversos colorantes.	Necesidad de más información fisiológica y genética. Problemas en control de pH.
	Enzimático	Eficiente, selecciona ciertas moléculas específicas	Puede ser costoso, requiere condiciones específicas para la actividad enzimática

Nota: La información fue tomada Cortazar et al (2012)

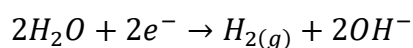
2.2. Electrocoagulación

La electrocoagulación es un proceso de tratamiento de aguas que utiliza la electrólisis para producir agentes desestabilizantes mediante la oxidación electrolítica del ánodo de sacrificio, es una técnica que utiliza una celda electroquímica para desestabilizar partículas coloidales mediante la producción de cationes metálicos in situ. Los electrodos metálicos (como aluminio o hierro) se sumergen en la disolución a tratar y al aplicar una corriente eléctrica, los electrodos liberan iones metálicos que se combinan con los iones presentes en la disolución para formar compuestos insolubles que se agrupan en flóculos que pueden ser removidos fácilmente mediante procesos de sedimentación o filtración. El ánodo metálico se utiliza como agente coagulante y se generan gases electrolíticos, como hidrógeno, en el cátodo. La técnica puede eliminar muchos contaminantes, como metales pesados, sólidos suspendidos, colorantes, materia orgánica, grasas, aceites, iones y radionúclidos. Las propiedades fisicoquímicas de los contaminantes y el proceso de eliminación de contaminantes pueden afectar su eficacia, como los iones que se precipitan y los sólidos suspendidos que el coagulante absorbe. Las especies catiónicas producidas en el ánodo durante el proceso electrolítico reaccionan con otras especies para producir hidróxidos y óxidos metálicos, como se muestra en las siguientes reacciones (Bermeo y Tinoco, 2016).

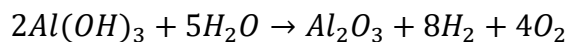
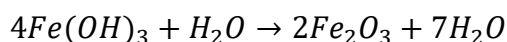
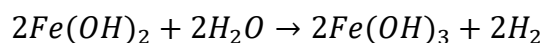
Reacciones en el ánodo



Reacciones en el cátodo

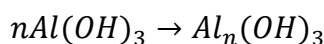
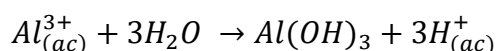
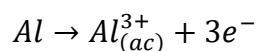


Reacciones en la solución



Etapas de la electrocoagulación

Generación de iones: Tomando como referencia un ánodo de aluminio, la oxidación electrolítica del ánodo de aluminio (Al) genera monómeros catiónicos como Al^{3+} y $Al_n(OH)_{3n}$ a través de las reacciones químicas que se describen a continuación:



Estos monómeros pueden actuar como coagulantes en el tratamiento de agua, el polímero gelatinoso generado a través de la oxidación electrolítica del ánodo de aluminio puede remover los contaminantes mediante la absorción y la aglomeración. Estos contaminantes se adhieren a las partículas del polímero y luego se precipitan al fondo del recipiente, lo que facilita su separación y eliminación (García et al., 2016).

Desestabilización de los contaminantes: Los iones generados se dispersan en la solución y se adsorben en las partículas de los contaminantes presentes en la solución, modificando la carga eléctrica de las partículas y rompiendo la estabilidad de la solución. La teoría de la doble capa es esencial para entender cómo funciona este proceso. Los contaminantes en la solución tienen una carga eléctrica superficial, y al entrar en contacto con un medio polar (como el agua), atraen iones del mismo signo y repelen iones de carga opuesta. Esto genera dos capas, una de

la densidad de corriente, lo que aumenta la capacidad de neutralizar los contaminantes. Sin embargo, si se usa una corriente demasiado alta, el agua se calienta, lo que reduce significativamente la eficacia del proceso. Por lo tanto, es crucial seleccionar la densidad de corriente correcta teniendo en cuenta el pH y la temperatura como otros parámetros de operación. (Arango, 2005).

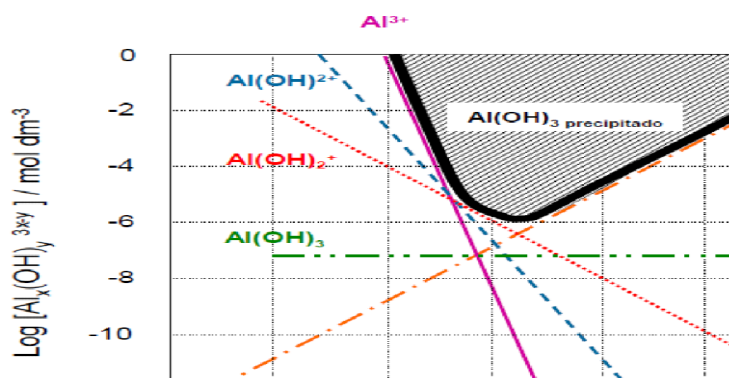
Presencia de NaCl: El NaCl en el agua residual tiene un impacto significativo en la eficacia del proceso de electrocoagulación. El aumento en la conductividad del agua residual debido a la presencia de iones de cloruro ayuda a mejorar la eficacia de la electrocoagulación al reducir los efectos adversos de iones como HCO_3^- y SO_4^{2-} . Estos iones pueden conducir a la precipitación de Ca^{+2} y Mg^{+2} , lo que puede formar una capa insoluble depositada sobre los electrodos, aumentando el potencial entre los electrodos y disminuyendo la eficiencia de la corriente. Sin embargo, es importante tener en cuenta que una cantidad demasiado alta de NaCl también puede tener un efecto negativo en el proceso de electrocoagulación, por lo que se recomienda mantener una cantidad de Cl^- del 20% para un proceso de electrocoagulación normal (Arango, 2005).

Potencial de hidrógeno: El pH juega un papel crucial en la electrocoagulación porque influye en la eficiencia de la corriente y en la disolución del hidróxido del metal. Se ha descubierto que el rendimiento del proceso mejora en valores de pH cercanos a 7. Sin embargo, en estas condiciones, se $2\text{H}_2\text{O} + 2e^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ consume una cantidad significativa de energía. La conductividad del agua también juega un papel importante en el efecto del pH, ya que cuando es alta, el efecto del pH no es significativo. Es importante tener en cuenta que el pH del agua residual puede cambiar después de la electrocoagulación, ya que puede incrementarse para aguas residuales ácidas y decrecer para aguas alcalinas. Esto se debe a la reacción del hidrógeno en el cátodo y la formación de hidróxido de metal (Arango, 2005).

El pH: Este parámetro juega un papel importante en la eficiencia de la electrocoagulación debido a su relación con la solubilidad de los iones de metal y la formación de especies poliméricas. A medida que el pH aumenta, la solubilidad de los iones de metal disminuye, lo que aumenta la eficacia de la coagulación. Sin embargo, si el pH es demasiado alto, puede haber una formación excesiva de especies poliméricas de metal, lo que puede afectar negativamente la eficiencia del proceso. El pH ideal para la electrocoagulación varía dependiendo del tipo de metal y de las condiciones del proceso. Por ejemplo, en la electrocoagulación con aluminio, el pH óptimo generalmente se encuentra entre 5 y 9, en donde se generan diversas especies poliméricas tales como Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_3$ (precipitado), $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, los cuales se representan en la Figura 5. Es importante tener en cuenta que el control del pH es esencial para garantizar una eficiencia óptima en el proceso de electrocoagulación (Moya, 2011).

Figura 5

Especies poliméricas de aluminio formadas en la electrocoagulación



Fuente: Moya (2011)

Temperatura: La temperatura tiene un efecto directo en la velocidad de reacción química en el proceso de electrocoagulación. A medida que la temperatura aumenta, también lo hace la actividad química y la eficiencia de la corriente. Sin embargo, hay un punto en el cual la eficiencia se vuelve a reducir debido a la disminución de la conductividad del agua a

altas temperaturas. Se ha descubierto que la eficiencia de la corriente aumenta inicialmente hasta alcanzar 60°C, su punto máximo, antes de disminuir. El aumento de la eficiencia con la temperatura se debe al aumento de la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio que se encuentra en la superficie del electrodo. (Arango, 2005).

Ventajas y desventajas del proceso de electrocoagulación

A continuación, se muestra en la Tabla 5 las ventajas e inconvenientes que surgen al aplicar la tecnología de electrocoagulación.

Tabla 5

Ventajas y desventajas de la tecnología basada en electrocoagulación

ELECTROCOAGULACIÓN	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Elimina casi completamente la turbidez, el color y el olor del agua.	La progresiva disolución del ánodo de sacrificio.
El proceso produce menos fango y ayuda a acondicionar el fango producido.	Consumo energético del proceso.
Los flóculos que se forman son de mayor tamaño y contienen menos agua ligada.	Producción de hidrógeno (H ₂) que puede dificultar la adecuada decantación.
Elimina las partículas coloidales más pequeñas.	Presencia de iones aluminio o hierro en el efluente y de compuestos de estos en el fango.
Las burbujas de gas llevan a los contaminantes a la	La capa impermeable de óxido en el cátodo hace que

superficie para que se puedan eliminar fácilmente. el proceso sea menos eficiente.

El campo eléctrico favorece la floculación sin requerir agitación mecánica. Es necesaria una alta conductividad del agua residual.

Menor contenido de sólidos totales disueltos en el efluente tratado. El hidróxido gelatinoso puede tender a solubilizarse en algunos casos.

Menores tiempos de retención hidráulica.

Alta reducción de compuestos fosforados.

Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes.

Fuente: Características basadas en Moya (2011)

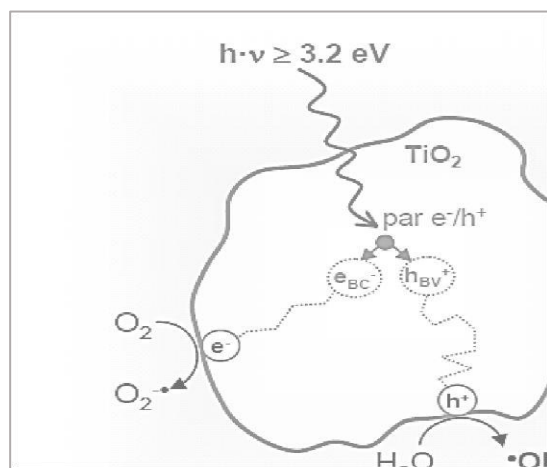
2.2.1. Fotocatálisis

La fotocatálisis solar es una técnica de tratamiento de agua que utiliza la radiación solar para promover reacciones químicas en contaminantes disueltos en el agua. El material fotocatalítico más comúnmente utilizado es el dióxido de titanio (TiO_2), ya que es un semiconductor inorgánico estable y de bajo costo. La fotocatálisis con TiO_2 se lleva a cabo mediante un proceso conocido como la generación de pares electrónicos, en el cual los fotones de radiación UV son absorbidos por el TiO_2 , generando electrones y huecos en la banda de conducción y valencia, respectivamente. Estos electrones y huecos migran a la superficie del fotocatalizador donde reaccionan con el oxígeno y el agua, produciendo radicales hidroxilos y superóxidos que son los responsables de la degradación de los contaminantes. Este proceso se lleva a cabo a una longitud de onda inferior a 387 nm, que es la longitud de onda correspondiente a la energía del

ancho de banda del semiconductor ($E_G=3.2$ eV). De acuerdo a la Figura 6, la fotocatalisis solar con TiO_2 es un método no selectivo y eficiente para la mineralización de contaminantes orgánicos persistentes en el agua (Miralles, 2011).

Figura 6

Representación de la fotocatalisis sobre la superficie de TiO_2 .



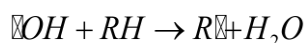
Fuente: Miralles (2011)

El par electrón-hueco es una pareja de electrones que se encuentran en un estado excitado debido a la absorción de un fotón de energía suficiente. El electrón se encuentra en un estado de alta energía y se desplaza a un nivel de energía superior, dejando un "hueco" vacío en su lugar original. Este hueco tiene una carga positiva y puede ser considerado como un portador de carga. En un semiconductor, como el TiO_2 utilizado en la fotocatalisis heterogénea, estos pares electrón-hueco se separan debido a la diferencia en los niveles de energía de las bandas de conducción y valencia. Los electrones se mueven a la banda de conducción, mientras que los huecos permanecen en la banda de valencia. Estos electrones y huecos excitados son los responsables de las reacciones químicas en la fotocatalisis heterogénea y son esenciales para la degradación de los contaminantes orgánicos persistentes en el agua.

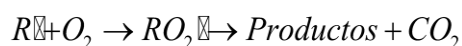
Procesos de oxidación avanzada

Los procesos avanzados de oxidación (PAO) son procesos de oxidación química utilizados para descontaminar aguas que contienen contaminantes orgánicos biorecalcitrantes y para desinfectar y eliminar patógenos emergentes. Estos procesos utilizan especies reactivas de oxígeno (ROS) para degradar las sustancias recalcitrantes en compuestos biodegradables. La producción de radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$) es un rasgo distintivo de los PAOs. Los radicales hidroxilos son el segundo oxidante más poderoso conocido después del flúor, y las constantes de velocidad para la mayoría de las reacciones en solución acuosa que implican radicales hidroxilos suelen estar entre 10^6 y $10^9 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Hay varias formas de producir ROS, lo que hace que los PAO sean más versátiles para satisfacer los requisitos específicos de tratamiento. Muchos de los procesos de oxidación, tales como TiO_2/UV , $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, foto-Fenton y ozono (O_3 , O_3/UV , $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$) se emplean actualmente en la descontaminación de aguas. Los radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) se generan en solución y debido a que son agentes fuertemente oxidantes, reaccionan frente a la mayoría de las moléculas orgánicas y muchas especies inorgánicas, principalmente mediante reacciones de abstracción de hidrógeno generando radicales orgánicos libres, los cuales pueden reaccionar con oxígeno molecular formando peroxiradicales, y pueden iniciarse reacciones de oxidación en serie que pueden conducir a la mineralización completa de los compuestos orgánicos persistentes (Mejía, 2013).

Abstracción de hidrógeno



Generación de peroxiradicales



Fotocatálisis homogénea

La fotocatalisis homogénea se refiere a un proceso de descontaminación en el cual el catalizador se encuentra disuelto en el medio a tratar durante el proceso redox. Dentro de la

fotocatálisis homogénea, se encuentran los procesos Fenton y Foto-Fenton. El proceso Fenton, está basada en la transferencia electrónica entre el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y el ion ferroso (Fe^{2+}), se utilizan ácido férrico y peróxido de hidrógeno para generar radical hidroxilo ($\bullet OH$) mediante la reacción entre el ácido férrico y el peróxido de hidrógeno. Estos radicales hidroxilos son altamente reactivos y son capaces de degradar contaminantes orgánicos biorecalcitrantes.

El proceso Foto-Fenton es similar al proceso Fenton, pero se utiliza radiación UV-visible para generar radicales hidroxilos. Esto permite una mayor eficiencia en la degradación de los contaminantes y una reducción en la formación de compuestos indeseables. Además, al utilizar la radiación solar, se logra un aprovechamiento de la energía natural, lo que lo hace una opción más sostenible. Sin embargo, es importante mencionar que este proceso es costoso comparado con un tratamiento biológico (García et al., 2016).

Fotocatálisis heterogénea

La fotocatalisis heterogénea se caracteriza por la presencia de un fotocatalizador, que es un material semiconductor, en una fase diferente a los reactivos. En este contexto, la superficie del semiconductor actúa como el medio propicio para desencadenar una reacción fotoinducida en la cual pueden participar diversas especies químicas, ya sea en fase acuosa o en fase gaseosa.

Para que se produzca una reacción fotocatalítica en un sistema heterogéneo, deben estar presentes tres elementos esenciales: un fotón emitido con la longitud de onda adecuada, una superficie fotocatalítica (generalmente un semiconductor) y un agente oxidante potente (frecuentemente oxígeno). El proceso de fotocatalisis heterogénea se inicia cuando un fotón con una energía igual o superior a la energía de la banda prohibida del semiconductor ($h\nu = E_{bg}$) incide en su superficie. Esto resulta en la generación de pares electrón-hueco (según la ecuación 1), los cuales pueden participar en reacciones de oxidación y reducción. Estas

reacciones tienen diversas aplicaciones, como la purificación de agua/aire y la disociación fotocatalítica del agua.

Durante esta generación, los electrones son elevados a la banda de conducción con una energía E_{bc} y los huecos a la banda de valencia con una energía E_{bv} . Lamentablemente, se produce una reacción de recombinación de los pares electrón-hueco (la ecuación 1 en sentido inverso), lo que resulta en ineficiencias en el proceso y en la pérdida de energía suministrada por los fotones incidentes. La recombinación puede ser mitigada mediante el uso de agentes de sacrificio como alcoholes, carbohidratos, hidrocarburos y contaminantes orgánicos, que reaccionan de manera irreversible con los huecos generados, permitiendo así lograr mayores eficiencias.

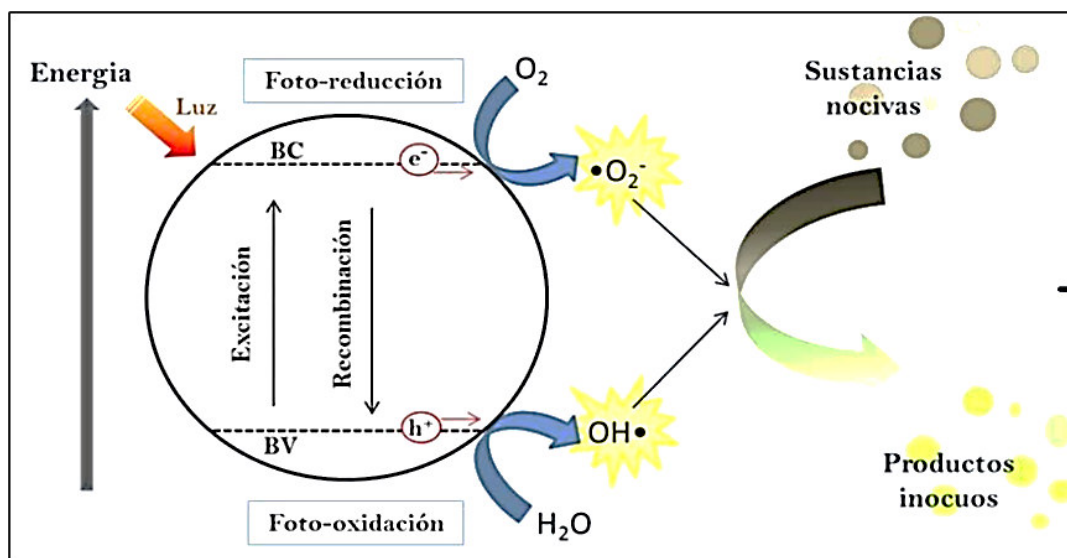
Aplicaciones de la electrocoagulación en tratamiento de aguas

La fotocatalisis homogénea es una técnica prometedora en la remediación ambiental y en la producción de hidrógeno. En esta técnica, el catalizador se encuentra disuelto en el medio a tratar durante el proceso redox. Una de las aplicaciones más destacadas de la fotocatalisis homogénea es la degradación de contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el agua y en el aire. Se ha demostrado que esta técnica es eficaz en la reducción de microorganismos en agua, lo que la convierte en una opción atractiva para la desinfección del agua. Además, la fotocatalisis homogénea también se utiliza en la producción de hidrógeno a través de la fotólisis del agua, convirtiéndola en una alternativa sostenible a los combustibles fósiles. Por último, la fotocatalisis homogénea también se está investigando para la fotosíntesis artificial, en la cual se busca disminuir el dióxido de carbono utilizando luz solar de manera similar a la que ocurre en las plantas (Ortiz, 2016).

En la Figura 7 se muestra el proceso de fotocatalisis sobre una partícula de catalizador.

Figura 7

Proceso de formación de radicales por acción de la radiación solar



Fuente: Jiménez y Castellote (2019)

Factores que intervienen en la fotocatalisis

Longitud de onda: La longitud de onda es importante porque el dióxido de titanio solo absorbe longitudes de onda inferiores a 400 nm, correspondientes al espectro ultravioleta. Cuanto menor es la longitud de onda, mayor es la capacidad del semiconductor para generar pares electrón-hueco, lo que significa que se aprovecha mejor la energía absorbida. Además, cuanto menor es la longitud de onda, menor es la distancia de penetración de los fotones en la partícula de TiO_2 , lo que reduce el tiempo necesario para que los pares electrón-hueco lleguen a la superficie de la partícula y se produzcan las reacciones químicas en el agua (Garcés et al., 2004).

Catalizador: El catalizador, en este caso el dióxido de titanio (TiO_2), es esencial en el proceso de óxido-reducción fotocatalítica ya que es el componente que tiene la capacidad de absorber la radiación ultravioleta y generar los pares electrón-hueco necesarios para iniciar las reacciones químicas en el agua. Sin embargo, la cantidad del catalizador utilizado también puede tener un efecto en la eficiencia del proceso debido a la turbidez que puede causar en el

agua y dificultar la difusión de la luz ultravioleta, Además, la disposición del catalizador también es importante. El TiO_2 puede estar en suspensión o inmovilizado en un soporte para mejorar la decantación y evitar utilizar el catalizador en suspensión. Sin embargo, el hecho de que las partículas de TiO_2 sean muy pequeñas puede dificultar su separación del agua tratada antes de su vertido o reutilización, lo que encarece el tratamiento (Garcés et al., 2004). El tamaño de las partículas de TiO_2 también puede afectar la eficiencia del proceso. Partículas más pequeñas tienen una mayor superficie específica, lo que aumenta la cantidad de sitios activos disponibles para las reacciones químicas.

Oxígeno: El oxígeno es esencial en el proceso de fotocatalisis, ya que los electrones generados en la reacción requieren una especie aceptadora de electrones para evitar la recombinación. El oxígeno molecular actúa como aceptor de electrones, generando el radical superóxido, el cual promueve la producción de más radicales hidroxilos. Además, una aireación controlada permite que el catalizador se mantenga en suspensión en el agua, favoreciendo una degradación más homogénea. Es importante tener una buena presencia de oxígeno disuelto en el agua para que el proceso fotocatalítico continúe (Garcés et al., 2004).

Temperatura: El efecto de la temperatura en la fotocatalisis resulta ser poco significativo; sin embargo, la variación de la temperatura puede tener un impacto en la eficacia de la fotocatalisis. A temperaturas más altas, la velocidad de las reacciones químicas aumenta, lo que puede llevar a una mayor eficacia en la degradación de los contaminantes. Pero, también puede haber una disminución en la estabilidad del catalizador a altas temperaturas, lo que puede reducir su vida útil. En contraparte, a temperaturas más bajas, la velocidad de las reacciones químicas disminuye, lo que puede llevar a una menor eficacia en la degradación de los contaminantes. No obstante, a menor temperatura, el catalizador puede ser más estable y tener una mayor vida útil. En general, la mayoría de los estudios han encontrado que la fotocatalisis es más eficaz a temperaturas moderadas, entre 20 y 40°C (Rubiano et al., 2005).

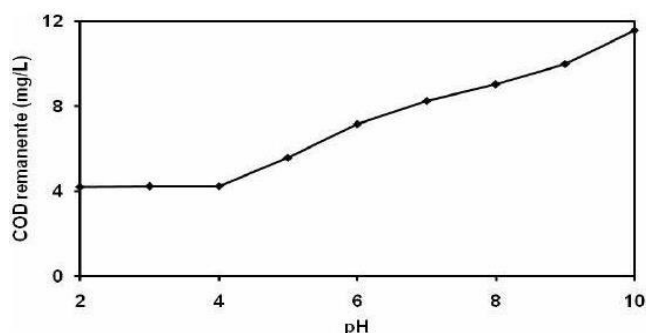
Potencial de hidrógeno: El pH posee un efecto significativo en el proceso de fotocátalisis, ya que se obtiene un aumento en la velocidad de reacción y un mejor rendimiento en cuanto a la degradación de los compuestos orgánicos, lo cual se logra ajustando el valor de la solución inicial mediante el uso de NaOH, KOH, H₂SO₄ o HNO₃ (Rubiano et al., 2005).

El pH: Es un parámetro que también puede afectar la eficacia de la fotocátalisis, al influir en la estabilidad y la disponibilidad del catalizador. El pH puede afectar la distribución de cargas en la superficie del catalizador, lo que a su vez afecta la adsorción y la actividad catalítica. Por ejemplo, si el pH está por debajo del punto isoeléctrico del catalizador de TiO₂ (pH=7), la superficie del catalizador se carga negativamente y esto puede disminuir la adsorción del compuesto a ser degradado y, por lo tanto, reducir la eficacia del proceso. Por otro lado, si el pH está por encima del punto isoeléctrico, la superficie del catalizador se carga positivamente, lo que puede aumentar la adsorción y mejorar la eficacia del proceso. Es importante trabajar en un rango de pH adecuado para asegurar una eficacia óptima del proceso (Garcés et al., 2004).

A modo de ejemplo, en la Figura 8 se observa que, para valores bajos de pH, por debajo del punto isoeléctrico del TiO₂, se obtiene valores bajos de carbono orgánico disuelto (COD) remanente, lo que se traduce en una alta adsorción de materia orgánica; mientras que por encima de pH=7, para valores altos de pH la adsorción disminuye.

Figura 8

Efecto del pH en la adsorción de materia orgánica.



Fuente: Valencia et al. (2011)

Ventajas y desventajas

En la Tabla 6, se muestran las ventajas y desventajas al aplicar la tecnología de fotocatalisis con TiO_2 .

Tabla 6

Ventajas y desventajas de la fotocatalisis con TiO_2

Fotocatalisis con TiO_2	
Ventajas	Desventajas
Capacidad para destruir prácticamente cualquier tipo de sustancia orgánica, incluidas mezclas complejas.	La eficiencia del proceso de fotocatalisis depende en gran medida de la intensidad de la luz incidente. En condiciones de baja iluminación, la eficiencia del proceso puede ser significativamente reducida.
Eliminación de sustancias contaminantes en un único proceso, sin necesidad de ser extraídas previamente.	El tiempo de reacción necesario para completar el proceso de fotocatalisis puede ser prolongado en comparación con otros métodos.
Bajo requerimiento de energía, con el proceso ocurriendo a temperaturas entre 30 y 80° C.	El catalizador, en este caso el TiO_2 , se degrada con el tiempo y su eficiencia disminuye.
Utilización de una fuente de energía limpia y abundante, como el sol.	El costo de producir TiO_2 de alta pureza y la instalación de sistemas de fotocatalisis puede ser significativo.
Eficiencia en comparación con otros métodos y seguridad en el proceso.	Requerimiento de un sistema de recuperación: El catalizador debe ser recuperado y reutilizado después del proceso de fotocatalisis, lo cual requiere un sistema de recuperación adicional.
Destrucción de sustancias tóxicas hasta compuestos totalmente inocuos.	
Capacidad para descomponer sustancias difíciles de tratar, como dioxinas, bifenilos policlorados (PCBs), disolventes, pesticidas y colorantes.	La fotocatalisis con TiO_2 tiene un rango limitado de pH, el cual debe ser considerado a la hora de tratar una solución, ya que si el pH no es el adecuado el proceso no será eficiente.
Capacidad para tratar sustancias orgánicas generando	

subproductos como agua, CO₂ y simples ácidos inorgánicos.

Fuente: Basado en Garcés et al. (2004)

La fotocatalisis con TiO₂ es un proceso altamente eficiente y seguro para la eliminación de sustancias contaminantes. Utilizando el sol como fuente de energía, el proceso destruye prácticamente cualquier tipo de sustancia orgánica y genera subproductos inofensivos. Sin embargo, también existen algunas limitaciones y desventajas en su uso, siendo las más destacadas:

- La eficacia del proceso puede verse afectada por la calidad y cantidad de luz, así como por la concentración de contaminantes en el medio.
- El proceso requiere una gran cantidad de TiO₂ para ser efectivo, lo que puede ser costoso.
- La degradación de algunos contaminantes puede requerir condiciones específicas, como un pH óptimo, lo que aumenta la complejidad del sistema.
- La fotocatalisis puede no ser adecuada para la eliminación de ciertos tipos de contaminantes, como los metales pesados o los compuestos inorgánicos.

Es importante considerar estas desventajas al diseñar un sistema de fotocatalisis y encontrar una solución que se adapte al contaminante y las condiciones ambientales.

La radiación solar

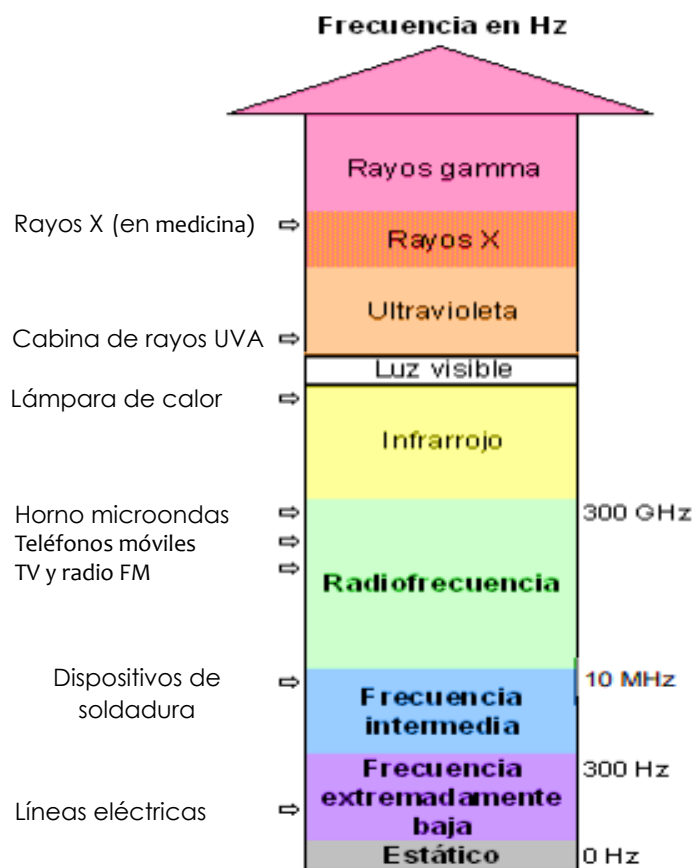
La energía proveniente del sol se llama energía radiante o radiación. Podemos describir la radiación electromagnética como una onda eléctrica y magnética que se propaga de manera similar a las ondas que se mueven, por ejemplo, sobre la superficie de un lago. Una onda de cualquier tipo de radiación electromagnética (como la luz o las radiaciones ultravioleta o infrarroja o los rayos X) se mueve a una velocidad fija C , conocida como "velocidad de la luz", que en el vacío es de 300.000 km/s. La onda consiste en una serie de crestas y depresiones. La distancia entre dos crestas (o depresiones) es llamada longitud de onda. (Camillioni y Vera, s.f)

Según señalan Camillioni et al. (s. f.) el rango total de tipos de radiación electromagnética que difieren por sus longitudes de onda constituye el espectro electromagnético. Las longitudes de onda en el rango visible se miden típicamente en nanómetros (nm). Un nanómetro es los mil millonésimos (10^{-9}) parte del metro. La radiación visible, o luz visible, posee un rango relativamente angosto de longitudes de onda, entre 400 y 700 nm. Dentro de este rango, el color de la luz dependerá de su longitud de onda. La longitud de onda visible más larga aparece ante nuestros ojos como roja, mientras que la más corta se registra como azul o violeta. Alrededor del 40 % de la energía del Sol es emitida en longitudes de onda más largas que el límite visible de 700 nm que constituyen la radiación infrarroja (IR). Las ondas infrarrojas tienen longitudes de onda entre 1.000 y 1.000.000 nm. En cambio, alrededor del 10 % de la energía del Sol es emitida en longitudes de onda más cortas que las de la luz visible, que constituyen la radiación ultravioleta (UV). Las longitudes de ondas ultravioletas son las menores que 400 nm.

En la Figura 9 se observa el espectro electromagnético emitido por el sol en el cual se observa que la luz visible ocupa un estrecho margen de longitud de onda.

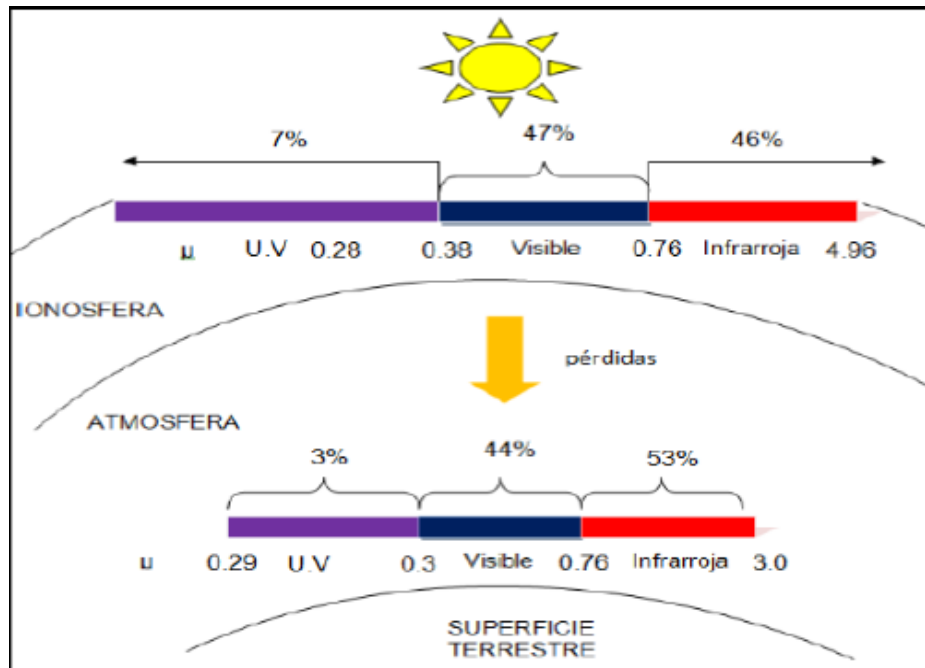
Figura 9

Ubicación de la luz visible en el espectro electromagnético



Fuente: Alonso et al (2011)

En el desarrollo de la presente investigación estamos interesados en conocer las propiedades del espectro de la luz visible, que se encuentra en el rango de 380 a 760 nm (nanómetros) tal como se muestra en la Figura 10.

Figura 10*Espectro energético del sol*

Fuente: Dávalos y Curicama (2008)

Habitualmente se considera a la luz como un conjunto de partículas denominadas fotones o quanta que se mueven en el espacio con una velocidad aproximada $C = 3.0 \cdot 10^8$ m/s; sin embargo, la luz no es solamente un conjunto de partículas, sino que involucra el concepto de onda, donde las partículas llevan asociada una longitud de onda, λ , con una determinada amplitud, γ , y frecuencia, f . Los fotones, por tanto, no son partículas, ni son ondas, sino que ambos aspectos son complementarios y necesarios para su correcto entendimiento. No existen experimentos conocidos que nos indiquen si los fotones tienen un tamaño físico; quizás puedan ser simplemente artefactos o “puntos” matemáticos. (ITE, s.f.)

Para el tratamiento de aguas, se requiere principalmente la radiación solar de frecuencia media del espectro que son las radiaciones UV y la radiación visible.

2.3. Colector solar

Los colectores solares son los medios que se requieren para absorber la radiación solar, que a su vez activan las reacciones químicas.

Durante la aplicación de la radiación solar hay tres sistemas térmicos solares desarrollados: Generador de potencia termosolar, calor solar para procesos industriales y calentamiento de agua y acondicionamiento de espacios; de estos tres, el tercero ha tenido un desarrollo mayor.

Sin embargo, la clasificación en base al índice de concentración (C), que se define como la razón entre el área de interceptación o entrada (A) y el área de absorción de la energía radiante o de salida (A_{abs}) es una propiedad importante de los colectores.

Los colectores que tienen un valor de $C=1$, se denominan colectores sin concentración y aquellos que tienen un valor mayor a 1 se denominan colectores con concentración. (Echevarría, 2011)

En la Tabla 7 se muestra la clasificación en base al criterio de concentración; en este trabajo nos centraremos en el desarrollo del proceso de descontaminación del agua con contenido de “*Taicron Red*” utilizando el colector parabólico compuesto tubular con rango de concentración entre 1-5.

Tabla 7*Tipos de colectores solares*

Seguimiento	Tipo de colector	Tipo de absorbente	Ratio de concentración	Rango de temp. (°C)
Estacionario	Plano (FPC)	Plano	1	30-80
	Tubo Evacuado (ETC)	Plano	1	50-200
	Parabólico	Tubular	1-5	70-240
	Compuesto (CPC)	Tubular	5-15	70-290
Un Eje	Reflectores Fresnel (LFR)	Tubular	10-40	60-250
	Cilindro Parabólico (PTC)	Tubular	15-45	70-290
	Cilíndrico (CTC)	Tubular	10-50	70-290
	Disco Parabólico (PDR)	Focal	100-1000	100-500
En Dos Ejes	Helióstato (HFC)	Focal	100-1500	150-2000
	Horno Solar	Focal	1500-5000	600-3000

Fuente: Echevarría (2011)

2.3.1. Colector parabólico compuesto

Estos colectores tienen la capacidad de reflejar al foco lineal toda la radiación incidente que captan. Usando múltiples reflexiones internas, cualquier radiación solar que entre al colector dentro de su ángulo de aceptación ($2\theta_c$), llega a la superficie absorbente que está en el fondo del colector. En la Figura 11 se observa como los rayos solares son reflejados, por la superficie reflectora del CPC, hacia el absorbedor. El ángulo de aceptación es elegido de acuerdo con el tipo de aplicación del colector. (Rivera & Tovar, 2016).

Según Aguirre y Demillon (2012), los colectores concentradores presentan ciertas ventajas respecto a los concentradores planos convencionales, las principales son:

- El fluido de trabajo llega a temperaturas mayores en un colector concentrador, tomando la misma superficie de colector en ambos. Esto significa que se puede lograr una mayor eficiencia termodinámica.

- Dado que la superficie absorbente es pequeña (con respecto al área total del colector), ocupar superficies de absorción selectivas y ocupar zonas de vacío en ésta para disminuir pérdidas son alternativas económicamente viables.
- Los colectores concentradores utilizan la radiación directa y dependiendo de su área de entrada, la radiación difusa.

También ofrecen desventajas comparativas. Las principales son:

- Es necesario implementar un sistema de seguimiento solar con los colectores para su mejor eficiencia, lo que encarecería el sistema.

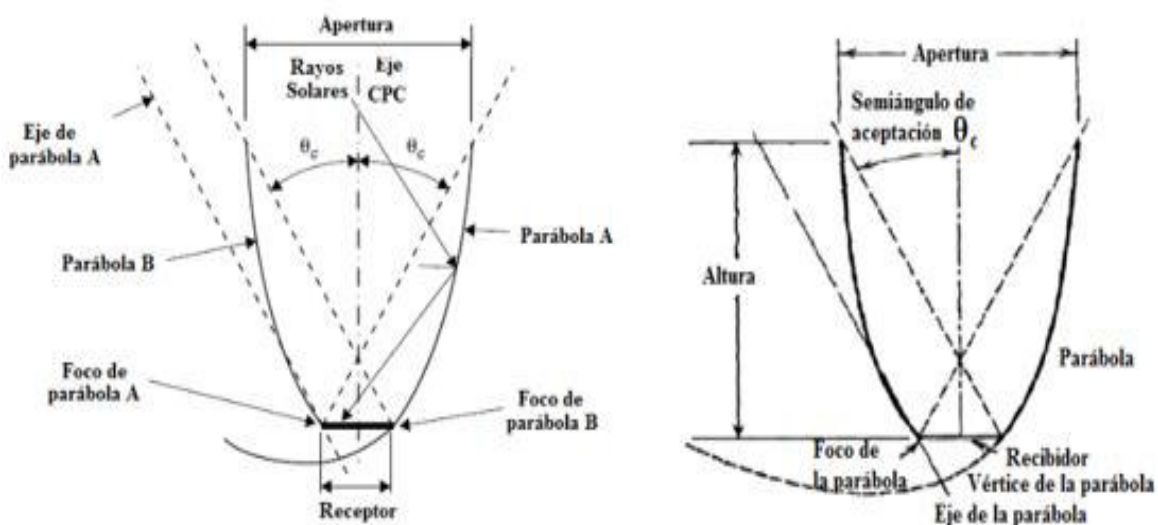
La superficie reflectora del colector puede perder sus propiedades con el tiempo y requiere mantenimiento periódico.

Diseño de un colector parabólico compuesto

Para diseñar el colector parabólico compuesto, se requiere una serie de relaciones matemáticas en el sistema de coordenadas polares y su equivalente en coordenadas rectangulares para su respectivo dimensionamiento. En el campo de la energía solar los sistemas de concentración son una de las tecnologías más usadas y el concentrador parabólico compuesto (CPC) tiene muchas posibilidades de ser usados en diversos campos como son el tratamiento de aguas con compuestos refractarios. La idea del CPC tiene un poco más de 40 años, fue concebido simultáneamente en 1966 en EEUU por Hinterberguer y Winston (es por este motivo que a este tipo de concentradores también se le conoce como colector de Winston), en Alemania en 1966 por Ploke, y en la URSS por Baranov y Melnikov. En 1974 Winston mostró las ventajas de este tipo de concentrador, como un concentrador de no imagen, para ser usado en dispositivos solares, y además mostrando que el CPC tiene la máxima concentración teórica posible (Echevarría, 2011). En la Figura 11 se observan los elementos básicos de un colector parabólico compuesto.

Figura 11

Esquema de un colector parabólico compuesto



Fuente: Duffie y Beckman (2006); Kalogirou, S. (2009)

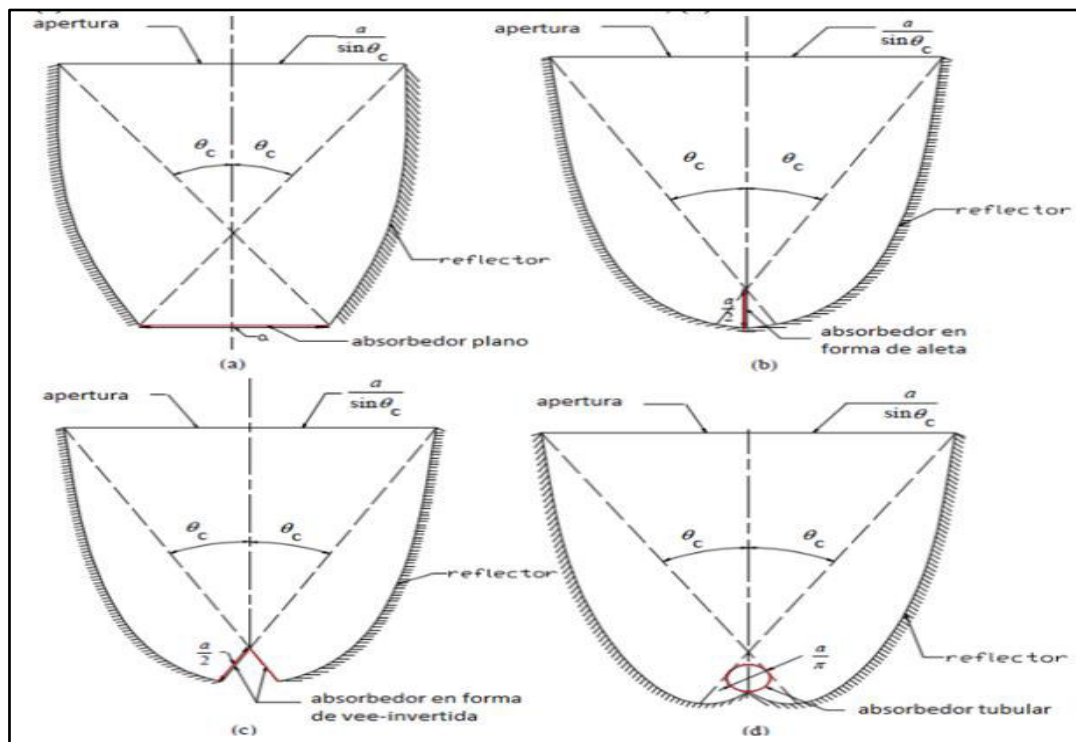
2.3.2. Formas de un Colector CPC

Un colector CPC puede ser diseñado para contener diversas formas de absorbedor, dando lugar a diferentes diseños. En la Figura 12 se muestran cuatro diferentes formas de absorbedores para CPC con sus respectivos reflectores. En dicha figura los 4 absorbedores tienen el mismo perímetro “a” y el mismo semiángulo de aceptación θ_c

En la Figura 12 se observan diferentes tipos de absorbedores: (a) CPC con absorbedor plano, (b) CPC con absorbedor en forma de aleta, (c) CPC con absorbedor en forma de “v-invertida”, (d) CPC con absorbedor tubular.

Figura 12

Modelos de colectores solares bidimensionales



Fuente: Rabl, (1976)

Por su versatilidad será utilizado el colector parabólico compuesto tipo d), es decir que el absorbedor será un tubo de vidrio por donde circule el fluido a tratar.

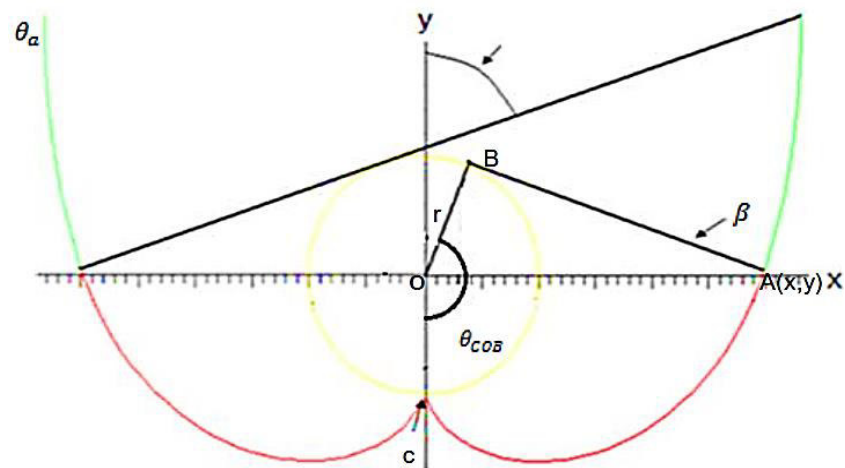
2.3.3. *Diseño de un colector parabólico compuesto con concentración*

Según Ascencio (2011) los CPC tienen la característica geométrica en la cual todos los rayos que entran al concentrador se reflejan en el foco de la parábola tal como se observa en la (Figura 11) todos los rayos que entran al colector se miden respecto a un ángulo denominado de aceptación. Este ángulo es medido respecto a una línea imaginaria que pasa por el centro geométrico del CPC, de tal forma que guarde simetría con ambos lados del concentrador; también se debe tener en cuenta el radio del tubo (r) ubicado en el foco, una línea tangente que va desde la circunferencia del tubo hasta la involuta (β) y el ángulo que forma entre las líneas COB. El colector parabólico compuesto se compone de tres partes, cada una de ellas con

sus respectivas ecuaciones en coordenadas polares y sus respectivas equivalencias en el sistema de coordenadas rectangulares, tal como se muestra en la Figura 13.

Figura 13

Esquema del diseño del colector parabólico compuesto



a) **El tubo de radio r: La ecuación correspondiente es:**

$$x = r \cos(\theta)$$

$$y = r \sin(\theta)$$

$$0 \leq \theta \leq 2\pi$$

b) **La involuta**

$$x = r(\sin \theta_{COB} - \theta_{COB} \cos \theta_{COB})$$

$$y = -r(\theta_{COB} \sin \theta_{COB} + \cos \theta_{COB})$$

$$0 \leq \theta_{COB} \leq \frac{\pi}{2} + \theta_a$$

c) **La parábola**

$$x = r(\sin \theta_{COB} - A \cos \theta_{COB})$$

$$y = -r(A \sin \theta_{COB} + \cos \theta_{COB})$$

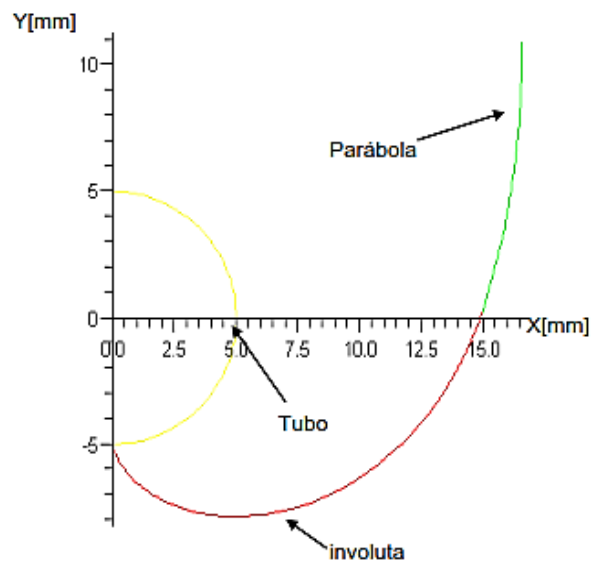
$$A = \frac{\pi / 2 + \theta_{COB} + \theta_a - \cos(\theta_{COB} - \theta_a)}{1 + \sin(\theta_{COB} - \theta_a)}$$

$$\frac{\pi}{2} + \theta_a \leq \theta_{COB} \leq \frac{3\pi}{2} - \theta_a$$

En la Figura 14 se aprecia la combinación de los tres elementos geométricos que constituyen el CPC.

Figura 14

Combinación de elementos geométricos que constituyen CPC

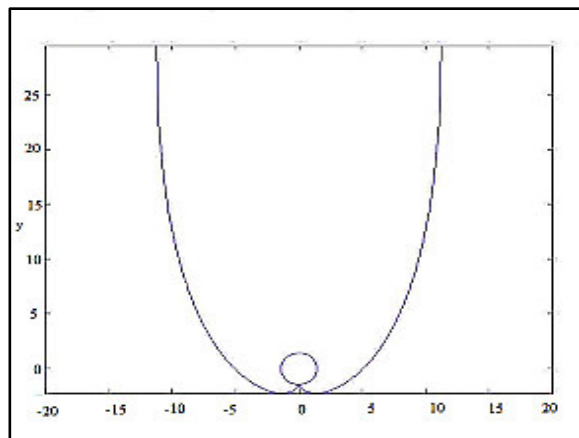


Fuente: Ascencio (2011)

Una vez desarrollado el diseño, el colector parabólico debe tomar la siguiente forma tal como se muestra en la Figura 15 y Figura 16.

Figura 15

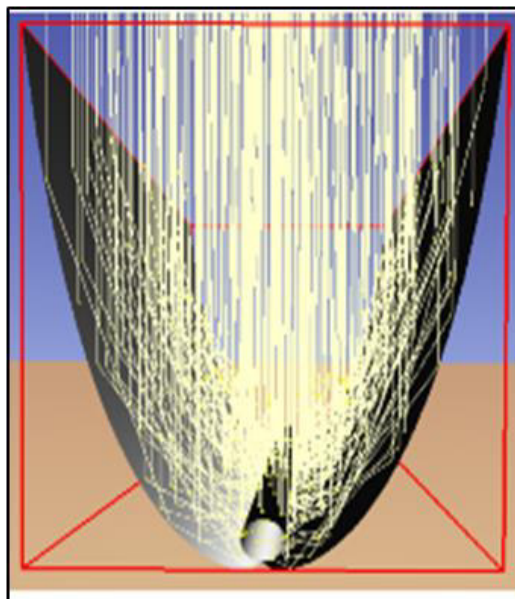
Simulación de la forma geométrica del colector parabólico compuesto.



Fuente: Soria et. al (2019)

Figura 16

Simulación de la forma geométrica del colector parabólico compuesto



Fuente: Soria et. al (2019)

2.4. Definiciones de términos básicos

2.4.1. Celdas electrolíticas:

Sumergidos en dicho material y conectados a una fuente de corriente continua. Los electrodos sirven como superficies donde ocurren las semi-reacciones de oxidación y reducción, pudiendo ser inertes si no participan en las reacciones. Estos electrodos pueden ser sólidos como Zn, Cu, Pt, Ag, líquidos como el Hg, o gaseosos como el electrodo de H₂.

Sin importar el tipo de celda (ya sea electrolítica o galvánica), los electrodos se identifican de la siguiente manera: el cátodo es el electrodo donde ocurre la reducción, mientras que el ánodo es el electrodo donde tiene lugar la oxidación. (Vera, 2007).

2.4.2. Fotorreactor

Aunque se han desarrollado diversos diseños de reactores fotocatalíticos para el tratamiento de agua y aire, no se encuentran referencias en la literatura sobre el desarrollo de reactores fotocatalíticos específicos para la producción de hidrógeno mediante energía solar. La falta de aplicaciones comerciales e industriales en la actualidad se atribuye principalmente a la baja eficiencia tanto de los fotocatalizadores como de las configuraciones propuestas para reactores a mediana y gran escala. A pesar de ello, los sistemas de producción de hidrógeno y tratamiento de aire/agua mediante fotocatálisis heterogénea están en constante desarrollo, y las investigaciones actuales se centran en el estudio de procesos fotocatalíticos más accesibles (Domínguez, 2017).

2.4.3. Termocuplas o Termopar

Un termopar es un dispositivo diseñado para medir la temperatura mediante efectos termoeléctricos. Se compone de dos conductores fabricados con metales distintos o aleaciones de metales diferentes, unidos en sus extremos. Entre las uniones de estos conductores se genera una diferencia de temperatura que da origen a una fuerza electromotriz. El principio de funcionamiento de estos sensores termoeléctricos se basa en los descubrimientos de Thomas

Johann Seebeck, Jean Peltier y William Thompson conocidos como efecto Seebeck, efecto Peltier y efecto Thompson. El efecto Seebeck se manifiesta en la generación de una diferencia de potencial entre dos puntos distintos de un conductor eléctrico que se encuentran simultáneamente a diferentes temperaturas. En el caso del termopar, este efecto da lugar a la aparición de una corriente eléctrica que solo está relacionada con la diferencia de temperaturas entre las uniones.

El efecto Peltier se basa en el fenómeno de calentamiento o enfriamiento de una unión entre dos metales diferentes, A y B, cuando se hace pasar una corriente a través de ella. La manifestación de este efecto depende exclusivamente del tipo de metal y de las temperaturas T_1 y T_2 de las uniones.

III. MÉTODO

3.1. Tipo de investigación

Por la naturaleza de los datos es de tipo cuantitativa, pues se basa en el estudio y análisis de la realidad a través de diferentes procedimientos sustentados en la medición; además, permite un mayor nivel de control e inferencia. Es posible realizar experimentos y obtener explicaciones contrastadas a partir de hipótesis. Respecto al enfoque cuantitativo Hernández et al. (2014) señalan que: “es secuencial y probatorio, reflejando la necesidad de medir y estimar magnitudes de los fenómenos o problemas de investigación”. (p. 4)

En función al propósito es de tipo aplicada debido a que confronta la teoría con la realidad, específicamente para resolver un problema de investigación real planteado. Sánchez et al. (2018) indican que: “es un tipo de investigación pragmática o utilitaria que aprovecha los conocimientos logrados por la investigación básica o teórica para el conocimiento y solución de problemas inmediatos. La investigación tecnológica es una forma de investigación aplicada”. (p. 79)

Según el tipo de inferencia es de tipo hipotético-deductivo pues se basa en hipótesis que generan teorías a partir de hechos observados mediante la inducción. Las hipótesis deben ser comprobadas y falseadas mediante la experimentación.

El nivel de investigación es explicativa causa-efecto pues se analizará el efecto de las condiciones de operación en la degradación del colorante disperso.

El diseño de la investigación de acuerdo a los medios para obtención de datos es de laboratorio; por su manipulación de variables es experimental; por el periodo temporal que se realiza es transversal, pues la investigación se realizará en un tiempo relativamente corto.

3.2. Población y muestra

La población está constituida por los colorantes textiles dispersos azoicos.

De ellos se ha tomado como muestra el colorante textil disperso azoico en base a antraquinona cuyo nombre comercial es “Taicron *Red E-ACT*”.

3.3. Operacionalización de variables

Tabla 8

Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Método
VI: Condiciones favorables	Las condiciones favorables, son aquellas condiciones manejables técnicamente que permitan la mayor tasa de remoción del colorante	Se estudia la influencia de las diferentes condiciones de operación mediante el diseño factorial de experimentos	Diseño del equipo	Funcionalidad para operar como sistema de electrocoagulación y reactor solar	Medición directa
			Concentración inicial de colorante	Tratamiento de soluciones de 1000 ppm y 500 ppm de colorante	Medición directa
					Medición directa
VD: Remoción de colorante	Es la mayor tasa de transformación del colorante disperso a una sustancia más inocua y apta para su vertimiento	La técnica para emplear para los análisis correspondientes es mediante espectrofotometría UV-Visible.	Cantidad de catalizador	100 mg/L	Medición directa
			Porcentaje de remoción	Relación de concentración de colorante al momento de medir respecto a la concentración inicial de colorante.	Técnicas espectrofotométricas

3.4. Instrumentos

A continuación, se detallan los instrumentos, equipos y materiales utilizados en el desarrollo de la tesis:

3.4.1. Equipos para el desarrollo experimental

Los equipos necesarios para el desarrollo experimental fueron los siguientes:

- a) Panel solar: Acondicionado para el desarrollo de la tesis
- b) Reactor solar: Diseñado y construido para el desarrollo de la tesis
- c) Celda electrolítica: Diseñado y acondicionado para el desarrollo de la tesis
- d) Bombas: Para transporte y agitación de las soluciones a tratar
- e) Termocuplas: Para la determinación de la temperatura

3.4.2. Equipos para análisis químico

Los equipos utilizados para analizar los diferentes resultados de la investigación fueron los siguientes:

- Espectrofotómetro IR (ver en el Anexo D)
- Espectrofotómetro UV-Visible
- Piranómetro digital para medir la intensidad de radiación solar (ver en el Anexo F)
- Equipo para la determinación de la DQO (Horno para la digestión más kits conteniendo dicromato de potasio y ácido sulfúrico).

3.4.3. Reactivos

Los reactivos necesarios para el desarrollo experimental fueron los siguientes:

- Solución modelo de reactivo disperso Taicron-red de 1000 mg/L y 500 mg/L
- Agua residual de industria textil
- Ácido sulfúrico concentrado 18 M
- Hidróxido de sodio: 0.1 M

- Peróxido de hidrógeno: 30 % volumen
- Sulfato ferroso heptahidratado
- Nanopartículas de dióxido de titanio en forma de anatasa
- Carbón activado granulado

3.4.4. Materiales

Los materiales necesarios para el desarrollo experimental fueron los siguientes:

- Papel de filtro
- Pipetas
- Vasos de precipitado de 4 litros y de 250 ml
- Probeta de 2, 1, 0.1 Litros
- Embudos
- Papel indicador de pH
- Software: Polymath y Microsoft Excel

3.5. Procedimiento

3.5.1. Diseño del equipo de electrocoagulación y catálisis solar

El equipo de electrocoagulación y catálisis solar consta de las siguientes etapas:

Acondicionamiento del panel solar, fue necesario acondicionarlo con el fin de cumplir con las siguientes funciones:

- a) Suministra energía al sistema de electrocoagulación, provista de 3 ánodos y 4 cátodos de 10x12 cm con un área total de 720 cm²
- b) Suministra energía a la bomba que permite la agitación de las soluciones a tratar.

- c) Suministra energía para el transporte de las soluciones al reactor solar (colector parabólico compuesto) el cual consta de 5 unidades de 22 mm de diámetro y 1 metro de longitud por unidad.

3.5.2. *Diseño y construcción del reactor solar*

El reactor solar es un dispositivo también denominado colector parabólico compuesto, su finalidad es incrementar en 2.5 veces la radiación solar del momento. El reactor consta de 5 unidades, cada una de 1 m de longitud; los componentes principales de cada unidad son: los receptores de la radiación (compuesto por la sección de la parábola y la involuta) y un tubo de vidrio de 22 mm de diámetro interno estándar, el cual condiciona el diseño de los receptores de la radiación.

Para la construcción de la sección del tubo se requiere el conocimiento del radio del tubo y su transformación de coordenadas polares a coordenadas rectangulares, para lo cual se utiliza las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}x &= r \cos(\theta) \\y &= r \sin(\theta) \\0 &\leq \theta \leq 2\pi\end{aligned}$$

Este cálculo se realizó con el software Polymath en el cual se editó las ecuaciones mostradas y el intervalo de ángulo de rotación (θ), lo que permitió realizar el trazo de la circunferencia del tubo de vidrio; el programa se denominó *radio.pol*

```
X = r * cos (TETHA)
Y = r * sin (TETHA)
TETHA (0) = 0
TETHA(f) = 6.2832 # (2 pi)
r = 1.1 # cm
d(P)/d(TETHA) = 1 # Función solo se usa para autogenerar
TETHA
P (0) = 0
```

Los resultados se muestran en la Tabla 18 del Anexo A.

Para la construcción de la involuta se requiere conocer del radio del tubo, así como los intervalos de los ángulos de recepción de la radiación solar que caerá sobre la superficie del receptor. Las ecuaciones son las siguientes:

$$x = r(\sin \theta_{COB} - \theta_{COB} \cos \theta_{COB})$$

$$x = -r(\theta_{COB} \sin \theta_{COB} + \cos \theta_{COB})$$

$$0 \leq \theta_{COB} \leq \frac{\pi}{2} + \theta_a$$

Este cálculo se realizó con el software Polymath, en el cual se editó las ecuaciones que se muestran y el intervalo de ángulo de rotación (θ), lo que permitió obtener el trazo de la sección de la involuta del receptor de la radiación solar; el programa se denominó *involuta.pol*

```
X = r * (sin (TETHA_C) - TETHA_C * cos (TETHA_C))
Y = -r * (TETHA_C * sin (TETHA_C) + cos (TETHA_C))
r = 1.1
TETHA_A = 23.5 * pi / 180
TETHA_C (0) = 0
TETHA_C(f) = 1.9809533# (pi/2+TETHA_A)
pi = 3.1416

d(P)/d(TETHA_C) = 1
P(0) = 0
```

Los resultados se muestran en la Tabla 18 del Anexo A

Para la construcción de la sección parabólica se requiere conocer el radio del tubo, así como los intervalos de los ángulos de recepción de la radiación solar, lo cual se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$x = r(\sin \theta_{COB} - A \cos \theta_{COB})$$

$$y = -r(A \sin \theta_{COB} + \cos \theta_{COB})$$

$$A = \frac{\pi / 2 + \theta_{COB} + \theta_a - \cos(\theta_{COB} - \theta_a)}{1 + \sin(\theta_{COB} - \theta_a)}$$

$$\frac{\pi}{2} + \theta_a \leq \theta_{COB} \leq \frac{3\pi}{2} - \theta_a$$

Este cálculo se realizó con el software Polymath en el cual se editó las ecuaciones mostradas y el intervalo de ángulo de aceptación (θ_a), lo que permitió realizar el trazo de la sección parabólica del receptor de la radiación solar; el programa se denominó *parábola.pol*

$$\begin{aligned}
 d(P)/d(TETHA_C) &= 1 \\
 P(0) &= 0 \\
 X &= r * (\sin(TETHA_C) - A * \cos(TETHA_C)) \\
 Y &= -r * (A * \sin(TETHA_C) + \cos(TETHA_C)) \\
 r &= 1.1 \\
 A &= (\pi/2 + TETHA_C + TETHA_A - \cos(TETHA_C - TETHA_A)) / (1 + \sin(TETHA_C - TETHA_A)) \\
 TETHA_A &= 23.5 * \pi / 180 \\
 \\
 TETHA_C(0) &= 1.9809533 \#(\pi/2 + TETHA_A) \\
 TETHA_C(f) &= 4.3022467 \#(3 * \pi/2 + TETHA_A) \\
 \pi &= 3.1416 \\
 \\
 CR_{max} &= 1 / \sin(TETHA_A)
 \end{aligned}$$

Los resultados se muestran en la Tabla 18 del Anexo A

Los datos generados por los tres programas se acondicionan en la hoja de cálculo Excel y se obtuvo la gráfica del colector parabólico compuesto, cuyo valor de la concentración solar se obtiene con la última línea del programa *parábola.pol* igual a 2.5078, es decir el colector diseñado permite concentrar 2.5 veces la radiación solar existente en el momento del experimento.

Posteriormente, los datos son editados en el software de diseño AUTOCAD para la realización del trabajo de corte con equipo láser, su posterior ensamblaje y acondicionamiento para obtener el diseño del colector solar. Con los datos obtenidos del radio del tubo y las dimensiones de la involuta y la parábola se realizó los trabajos de construcción en un taller mecánico y un taller de vidrio, complementado con sistemas de control electrónico para el control de las bombas y suministro de corriente en el equipo de electrocoagulación.

Acondicionamiento de la celda electrolítica

Es una cubeta de plástico cuya capacidad de operación es de 10 litros, a la cual se acondicionó dos barras conductoras de cobre para soportar los electrodos; los cuales están constituidos por 7 electrodos (3 electrodos de aluminio y 4 electrodos de acero) con un área efectiva de 720 cm², los electrodos se colocan en forma alternada considerando que los electrodos de aluminio estén ubicados siempre entre dos electrodos de acero.

3.5.3. *Tratamiento de las soluciones con colorante textil*

Se realizó el tratamiento a nivel piloto de dos soluciones modelo del colorante disperso “taicron-red” de 1000 mg/L y 500 mg/L y, un agua residual industrial obtenida de una empresa textil; mediante electrocoagulación y foto Fenton con radiación solar.

A.- Tratamiento por electrocoagulación con energía eléctrica generada por radiación solar

Para el caso del proceso de electrocoagulación de las soluciones de 1000 y 500 mg/L, se realizaron pruebas preliminares para estimar el tiempo requerido para la electrocoagulación estableciéndose 40 minutos como el tiempo apropiado, pues luego de este tiempo ya no se observó cambios sustanciales en la decoloración.

Primera electrocoagulación

Se preparó 10 litros de una solución de colorante disperso *Taicron Red* de 1000 mg/L y 500 mg/L. En la Figura 17 se muestra las soluciones, se observa la diferencia marcada de la intensidad del color.

Figura 17

Soluciones modelo de colorante “taicron-red” de 1000 mg/L y 500 mg/L



La muestra de 1000 mg/L que fue sometida a una primera electrocoagulación por 40 minutos en la celda electrolítica, a una intensidad de corriente de 4 Amperios y 12 Voltios. La eliminación del colorante se produce por flotación debido a la formación de burbujas generadas

por el hidrógeno en el ánodo, y por coagulación producto de la formación de hidróxido en el cátodo, el proceso simultáneo se denomina electrocoagulación. Luego de los 40 minutos la solución es filtrada y sometida a una segunda electrocoagulación.

Este procedimiento se realizó por triplicado, cada solución se filtró y mezcló para asegurar un valor representativo del promedio de concentración remanente del colorante.

Segunda electrocoagulación

La solución filtrada pasa a una segunda electrocoagulación por 40 minutos con la finalidad de eliminar el colorante remanente y los posibles aditivos que pueda contener. Se utiliza el mismo equipo y las mismas condiciones de la primera electrocoagulación.

Este segundo proceso de electrocoagulación de la solución de 1000 mg/L del colorante disperso taicron-red también se realizó por triplicado, cada solución se filtró y mezcló para asegurar un valor representativo del promedio de concentración remanente del colorante, se obtuvo 27.5 litros, con los cuales se procedió al tratamiento foto frentón heterogéneo en el reactor solar.

Con la solución de 500 mg/L se procedió del mismo modo, obteniendo un volumen de agua tratada de 27 litros luego de la segunda electrocoagulación, con lo cual se procedió al tratamiento foto frentón heterogéneo en el reactor solar.

B.- Tratamiento por foto Fenton heterogéneo en el reactor solar

La solución de 1000 mg/L del colorante disperso *taicron-red* proveniente de la ***segunda electrocoagulación*** se separa en tres partes iguales (9 litros). Cada uno de estos volúmenes es sometido al tratamiento en el fotorreactor utilizando las siguientes especificaciones:

- pH=3: dado que el pH de la solución luego de la segunda electrocoagulación fue neutro
- (pH=7) se agregó ácido sulfúrico concentrado para ajustar el pH, pues el proceso de foto oxidación se trabaja en medio ácido.

- Peróxido de hidrógeno al 30% volumen: 12 mL/L de agua
- Sulfato ferroso heptahidratado: 100 mg/L
- Nanopartícula de dióxido de titanio de 25-50 nm en forma de anatasa: 100 mg/L
- Tiempo de exposición: 180 minutos
- Frecuencia de muestreo: cada 30 minutos
- Temperatura media: 41°C

El proceso consistió en mezclar los reactivos antes indicados, hasta disolución completa; se conecta a la bomba para poner en movimiento la solución a través de los tubos de vidrio del fotorreactor; se toma las muestras respectivas cada treinta minutos.

A continuación, en la Figura 18 se aprecia el tratamiento de las soluciones en el foto reactor solar.

Figura 18

Tratamiento de las soluciones en el foto reactor solar



Se precisa que la temperatura inicial sea de 28 °C, sin embargo, luego de aproximadamente media hora de tratamiento llega a 41°C, ello favorece significativamente a la oxidación de la materia orgánica de las soluciones tratadas.

Para la solución de 500 mg/L del colorante disperso *Taicron Red* proveniente de la *segunda electrocoagulación* el tratamiento en el fotorreactor se realizó con las mismas especificaciones descritas para la solución de 1000 mg/L.

3.5.4. Tratamiento aplicado a un agua residual con colorante textil

El agua residual utilizada en el presente estudio fue proporcionada por una industria textil ubicada en el distrito de Ate y según información de la empresa, la muestra fue un agua residual mezclada, proveniente de todos los procesos de teñido (las aguas residuales de colorantes industriales son mucho más complejas que las de una solución modelo), y contiene los siguientes componentes:

- Colorantes reactivos, dispersos y directos.
- Pigmentos procedentes del proceso de lavado con índigo e hipoclorito de sodio y bisulfito de sodio.
- Neutralizantes de la soda y carbonatos.
- Enzimas antipilling de desgomado.
- Dispersantes y
- Sal textil.

El agua residual utilizada para este tratamiento fue proporcionada suministrado por la empresa tenía apariencia clara, sin sólidos en suspensión, color azulado y un pH de 6, como se muestra en la Figura 19.

Las condiciones de tratamiento por electrocoagulación fueron de 12 voltios, 4 Amperios y tiempo de operación 40 minutos; se aplicó dos procesos de electrocoagulación.

Figura 19

Muestra del agua residual de la industria textil



3.5.5. Análisis de laboratorio de las soluciones tratadas

Las muestras del proceso foto fenton fueron tomadas a intervalos de 30 minutos por un espacio de 3 horas, para lograr la disminución de la demanda química de oxígeno.

El análisis del cambio de la intensidad de coloración se realizó por espectrofotometría de UV-Visible en el Laboratorio de análisis de la Facultad de Ingeniería Química del Callao. La determinación de la DQO fue realizada en el Laboratorio de servicios de análisis químico (LASAQ) del Departamento Académico de Química de la Universidad Agraria La Molina, los resultados se observan en el Anexo G.

3.6. Análisis de datos

Para el diseño de los componentes del reactor solar se utilizó el software Polymath, que permitió generara datos de la circunferencia del tubo, la involuta, y la parábola

El software Excel permitió organizar los datos para su tratamiento apropiado utilizando el software Autocad para la realización de los cortes de las láminas de metal.

Los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental fueron ordenados en el software Excel; asimismo, los reportes de los laboratorios han sido tabulados y graficados en el software Excel.

3.7. Consideraciones éticas

En el desarrollo de la presente investigación se ha tenido en cuenta los aspectos éticos relacionados al respeto por los derechos de autor; se han realizado las citas sin el contenido de la investigación y en las referencias considerando la normativa de redacción científica APA séptima edición. Los datos reportados del desarrollo experimental y de los análisis químicos son fidedignos. Asimismo, en la ejecución de los experimentos se han considerado los protocolos establecidos en los laboratorios respectivos.

IV. RESULTADOS

4.1. Respecto al diseño y construcción del equipo de electrocoagulación y reactor solar

El sistema de electrocoagulación y Colector Parabólico Compuesto (CPC) diseñado se caracteriza porque utiliza la energía solar directa para el desarrollo del proceso y energía solar convertida a energía eléctrica para la utilización de las bombas y el sistema de electrocoagulación. A continuación, se describen las características y funcionalidad logrados en los componentes del equipo:

Características del panel solar

El panel solar adquirido a una empresa importadora de estos paneles fue ensamblado en un soporte móvil para el traslado de un lugar a otro y a su vez, para el giro sobre un eje móvil con la finalidad de poder captar la mayor radiación solar; asimismo fue ensamblado un controlador que permite en primer lugar visualizar el nivel de carga y en segundo lugar apagar el equipo cuando se genera sobrecarga o corto circuito, tal como se observa en la Figura 20.

Figura 20

Panel solar ensamblado en un soporte móvil traslacional y rotacional



Reactor solar o Colector Parabólico Compuesto

Una vez obtenido los valores generados por los tres programas *radio.pol*, *involuta.pol* y *parábola.pol*, descritos en el procedimiento (ítem 3.5.2) se obtiene la longitud de la abertura y altura del receptor de la radiación solar, cuyos valores son de 17.32 y 21.09 cm, respectivamente; la longitud de cada unidad es de 1 m. El CPC construido tiene 5 unidades. Cada unidad contiene un tubo de vidrio de 22 mm de diámetro y 1 metro de longitud, por donde circula el agua a tratar

El valor de la concentración solar es de 2.5, es decir el colector diseñado permite concentrar 2.5 veces la radiación solar del entorno, en el momento del experimento.

En la Figura 21 se muestra el Colector Parabólico Compuesto, compuesto por 5 unidades de 1 metro cada uno.

Figura 21

Colector parabólico compuesto (fotorreactor)



Celda electrolítica

La celda electrolítica es una cubeta de 10 litros de capacidad útil (31 cm de longitud, 21 cm de ancho y 18 cm de altura), al cual se le acondicionaron dos barras conductoras que

hacen las veces de ánodo y cátodo. Estas dos barras son perforadas con brocas de 2 mm en un número de 7 igualmente distanciadas a lo largo de la barra con la finalidad de distribuir de forma apropiada 4 cátodos de acero (inerte) y 3 ánodos de aluminio para realizar la electrocoagulación del colorante y otros reactivos auxiliares utilizados en la industria textil. La energía para la electrocoagulación proviene del panel solar.

En la Figura 22 se observa la celda electrolítica y sus respectivos electrodos empleada para este estudio.

Figura 22

La celda electrolítica y sus respectivos electrodos



Bombas

El equipo cuenta con dos pequeñas bombas que fueron fijadas sobre un soporte de madera y permiten el movimiento del fluido, tal como se observa en la Figura 23. Una de las bombas es usada para transportar el agua tratada desde un depósito hacia el fotorreactor y desde este nuevamente al tanque de almacenamiento. La otra bomba es utilizada para dar movimiento al fluido (en reemplazo de la agitación), durante el proceso de electrocoagulación. Ambas bombas utilizan la energía del panel solar.

Fuente de alimentación: Corriente continua de 12 voltios y 2 amperios; capacidad: 3.1 L/min y presión ejercida: 0.48 MPa.

Figura 23

Bomba centrífuga de corriente continua



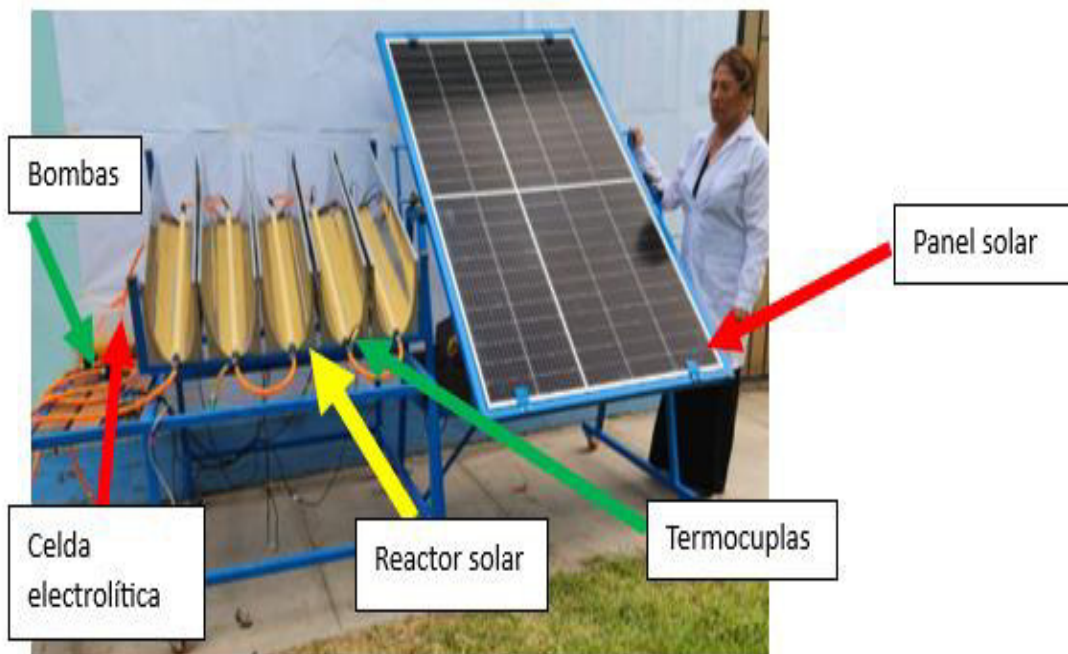
Instalación de las termocuplas

Se instaló una serie de termocuplas para sensar la temperatura del reactor durante el proceso de tratamiento con el reactor solar, para lo cual se utilizó un sistema electrónico denominado “Arduino”.

En la Figura 24 se observa el fotorreactor completo con sus respectivos accesorios y conexiones para su correcto funcionamiento.

Figura 24

*Equipo para el proceso combinado de electrocoagulación y catálisis solar
construido en la presente investigación*



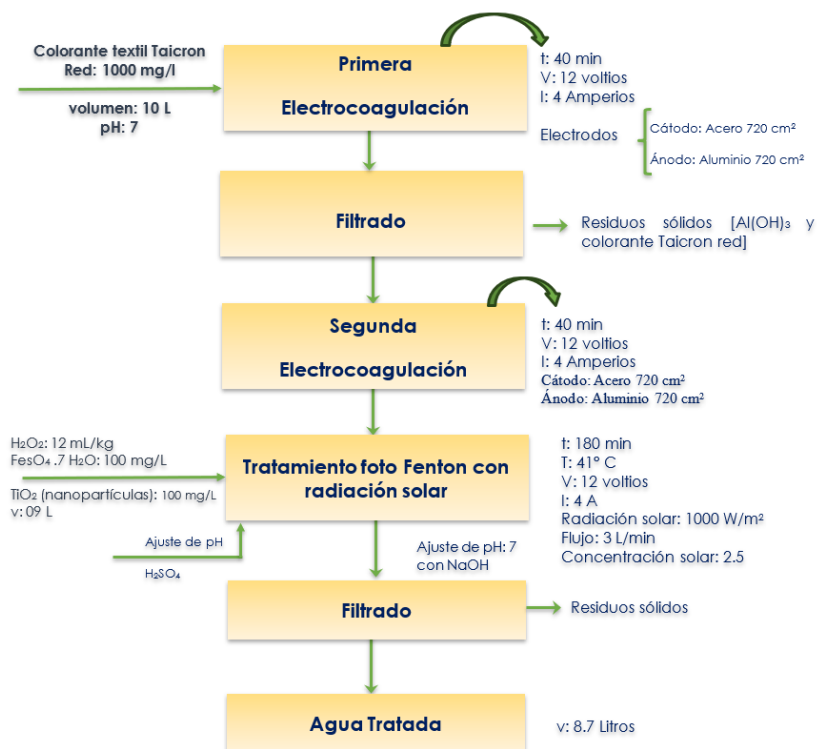
4.2. Respecto a los tratamientos por electrocoagulación y foto Fenton en el reactor solar

4.2.1. Tratamiento por electrocoagulación

Se realizó el tratamiento de las soluciones modelo del colorante disperso “taicron-red e-act” de 1000 mg/L y 500 mg/L. El diagrama de flujo general de los procesos y los parámetros de operación se describen en la Figura 25.

Figura 25

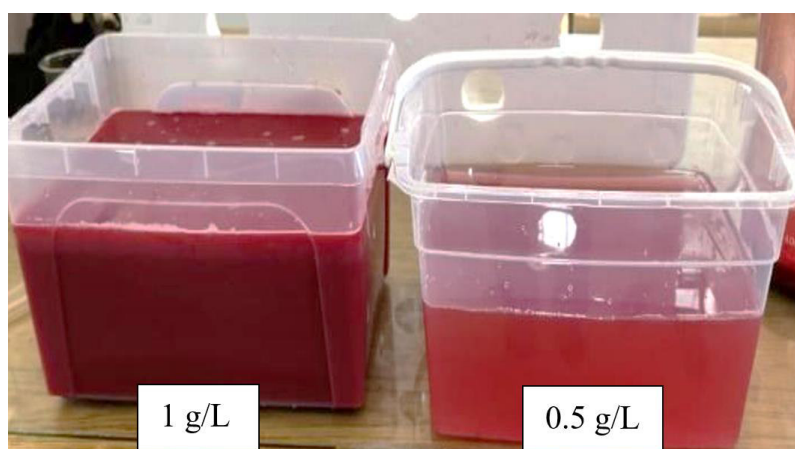
Diagrama de flujo general del tratamiento por electrocoagulación y foto Fenton con radiación solar (catálisis solar)



Al inicio del tratamiento las soluciones muestran las siguientes intensidades de color tal como se observa en la Figura 26.

Figura 26

Solución acuosa de colorante taicron-red de 1 g/L y 0,5 g/L respectivamente

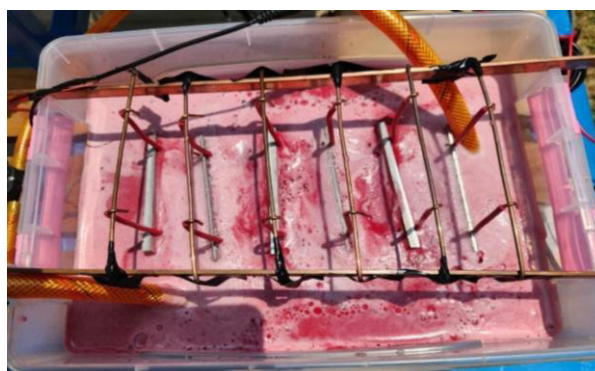


Primera electrocoagulación

En la Figura 27 se muestra el proceso de electrocoagulación, en el cual el floculo de baja densidad que se forma asciende a la parte superior, mientras que los de alta densidad permanecen en suspensión, luego de un tiempo de reposo los flóculos sedimentan en el fondo, facilitando su separación.

Figura 27

Proceso de electrocoagulación del colorante taicron-red 1000 mg/L



Luego de concluido el proceso de electrocoagulación se retira los electrodos y los floculo sobrenadantes se retiran manualmente con una espátula tal como se observa en la Figura 28 para permitir que quede solo el floculo sedimentable.

Figura 28

Flóculos sobrenadantes en la solución tratada



Una vez retirado los flóculos sobrenadantes se dejan en reposo para que el hidróxido de aluminio generado en el proceso electrolítico unido al colorante decante por fuerzas electrostáticas, tal como se observa en la Figura 29.

Figura 29

Proceso de decantación del flóculo (hidróxido de aluminio con colorante disperso)



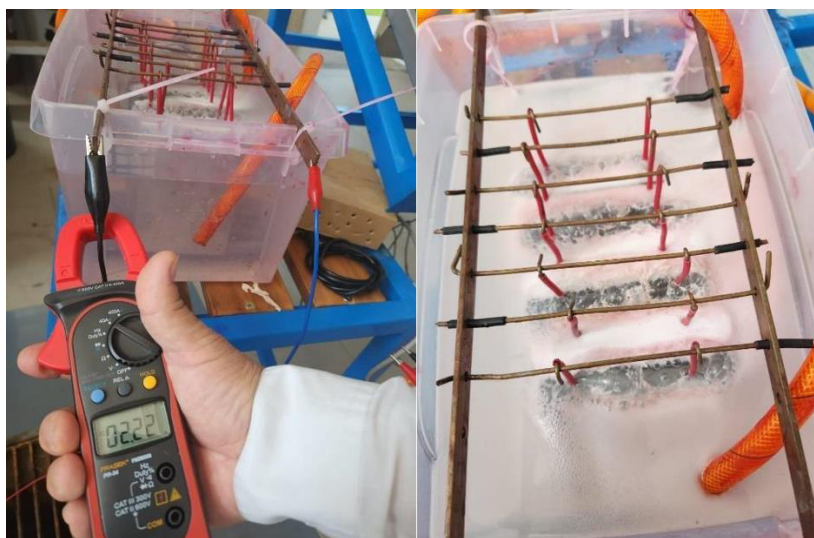
Luego del proceso de decantación, se somete a la filtración con la finalidad de eliminar los residuos sólidos (floculo decantado).

Segunda electrocoagulación

En la Figura 30 se observa los resultados de la segunda electrocoagulación, en el cual el agua tratada tiene una menor intensidad de coloración

Figura 30

Segunda electrocoagulación del liquido filtrado



Luego de culminado el proceso de electrocoagulación se elimina la espuma sobrenadante y se deja decantar la solución tal como se observa en la Figura 31.

Figura 31

Proceso de decantación proveniente de la segunda electrocoagulación



Luego de la decantación y filtrado, el agua queda visualmente transparente; sin embargo, contiene otras sustancias orgánicas provenientes del colorante aun sin remover, por ello se realiza el tratamiento foto Fenton en el reactor solar.

4.2.2. Tratamiento foto Fenton en el reactor solar a la solución de 1000 mg/L

A las soluciones tratadas de 1000 mg/L luego de la segunda electrocoagulación se somete al proceso foto Fenton con la finalidad de disminuir la demanda química de oxígeno. En la Figura 32 se observa el desarrollo del proceso foto Fenton.

Figura 32

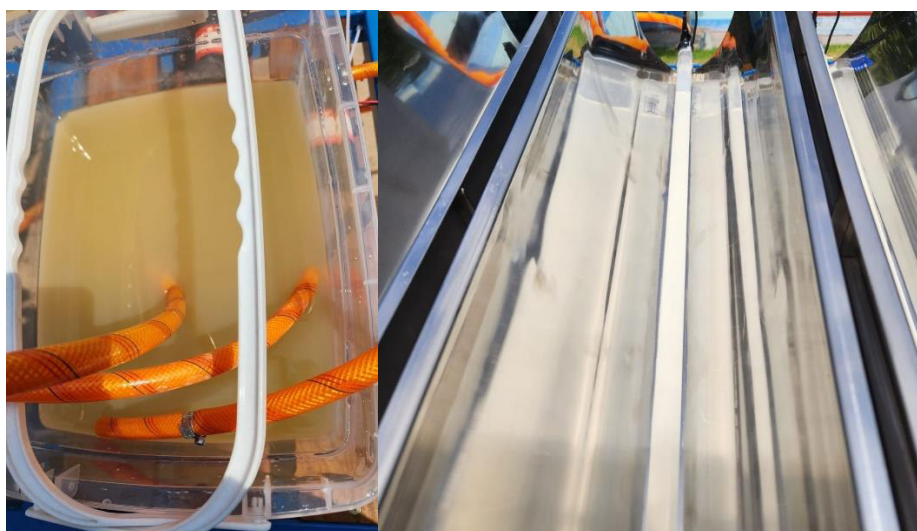
Tratamiento del agua de la primera electrocoagulación



En la Figura 33 se observa el detalle de la solución circulante a través del fotorreactor, el cual es alimentado desde un depósito rectangular y recirculado hacia el mismo con la finalidad que la solución pueda tener un tiempo de residencia apropiado.

Figura 33

Solución circulante sometido a la foto oxidación



Se procede del mismo modo para las otras dos porciones y luego los productos finales se mezclan y se obtiene una solución cuyas propiedades corresponden a los valores medios del proceso.

La solución final es filtrada y almacenada para los análisis químicos respectivos; los datos reportados de la DQO realizada en la Universidad Agraria La Molina son mostrados en la Tabla 9.

Tabla 9

DQO, para la solución de 1000 mg/L luego de segunda electrocoagulación

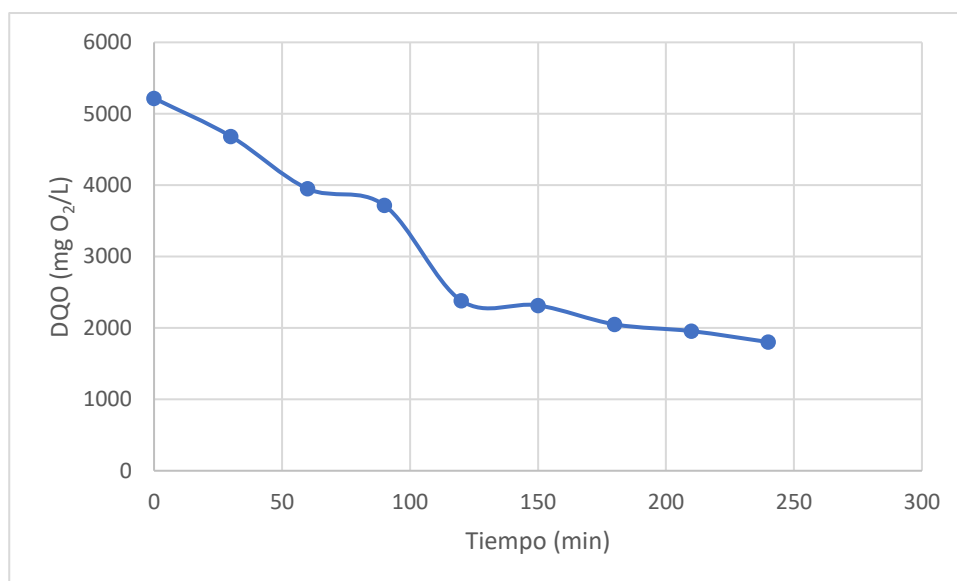
Tiempo (min)	DQO (mg O ₂ /L)
0	5216.7*
30	4683
60	3950
90	3716.7
120	2383.3
150	2316.7
180	2050

(*) Muestra inicial, antes de la electrocoagulación

En la Figura 34 se observa la evolución temporal de la demanda química de oxígeno, con una tendencia a la mineralización continua, hasta llegar a un valor cercano a 2000 ppm., cuyo valor disminuyó desde un valor por encima de 5000 ppm.

Figura 34

Cinética de la demanda química de oxígeno para una concentración inicial de 1 g/L



Como consecuencia de los resultados obtenidos cuyos valores se encuentran por encima de los límites máximos permisibles se procedió a neutralizar el remanente de hierro para disminuir el valor de la DQO; mediante la adición controlada de hidróxido de sodio hasta obtener un pH de 9; el precipitado formado se muestra en la Figura 35

Figura 35

Proceso de neutralización del hierro remanente



Es probable que debido al medio reductor (presencia de materia orgánica), se haya formado el óxido ferroso férrico (magnetita)

Conocido la longitud de onda de 530 nm, se elabora la curva patrón para la lectura de los datos de la muestra problema. En la Figura 55 del Anexo C, se observa la curva patrón; luego de la regresión, la ecuación de la recta viene a ser:

$$\text{Concentración} = a_0 + a_1 * \text{Absorbancia}$$

$$a_0 = 0.0001712 \quad a_1 = 2.907137, \text{ con un } R^2 = 9998315, R^2_{aj} = 9998074 \text{ y } \text{VAR} = 4.531 \times 10^{-5}$$

Luego, con el conocimiento de la absorbancia de la muestra problema se determinó la concentración en función al tiempo, tal como se observa en la Tabla 10.

Tabla 10

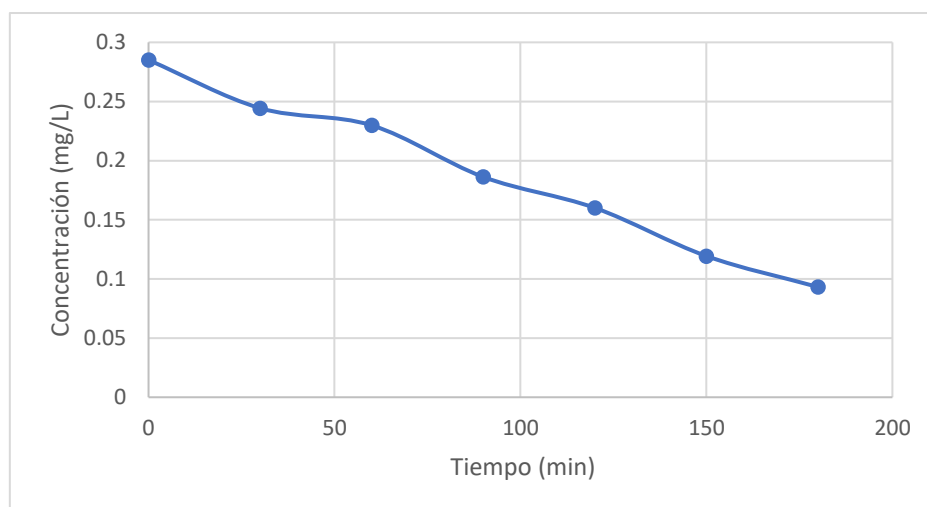
Concentración y porcentaje de remoción de colorante para 1 g/L de colorante y 100 mg de TiO₂

Tiempo (min)	Absorbancia	Concentración (mg/L)	% de Remoción
0	0.098	0.28507063	71.49
30	0.084	0.24437071	75.56
60	0.079	0.22983502	77.01
90	0.064	0.18622797	81.37
120	0.055	0.16006374	83.99
150	0.04	0.11936382	88.06
180	0.03	0.09319958	90.68

En la Figura 36 se observa la influencia del tiempo en el tratamiento del agua residual con contenido de colorante, lo cual claramente tiene una tendencia decreciente en concentración de colorante y consecuentemente un porcentaje elevado de remoción.

Figura 36

Evolución temporal de la concentración de colorante



4.2.3. Tratamiento foto Fenton en el reactor solar a la solución de 500 mg/L

Se obtuvo un precipitado rojizo, debido a que el medio es probablemente oxidante a diferencia del caso de 1 g/L. En la Figura 37 se observa el precipitado rojizo de hematita formada durante la etapa de eliminación del hierro remanente.

Figura 37

Proceso de neutralización del hierro remanente



La demanda química de oxígeno obtenido para el caso de 0.5 mg/L operada bajo las mismas condiciones dadas para el caso de 1 g/L de colorante es la siguiente.

Se procedió bajo las mismas condiciones del caso anterior, es decir para el caso del agua de 1000 mg/L de concentración de colorante, cuyas especificaciones se muestran a continuación:

- ✓ Peróxido de hidrógeno 30% volumen: 12 mL/L de agua
- ✓ Sulfato ferroso heptahidratado: 100 mg/L de agua
- ✓ Nanopartícula de dióxido de titanio de 25-50 nm en forma de anatasa: 100 mg/L
- ✓ Tiempo: 180 minutos
- ✓ Muestreo cada 30 minutos
- ✓ Temperatura media de 41 °C

La solución final es filtrada y almacenada para los análisis químicos respectivos; los datos reportados de la DQO realizada en la Universidad Agraria La Molina son mostrados en la Tabla 11.

Tabla 11

DQO, para la muestra de 500 mg/L de colorante luego de la segunda electrocoagulación

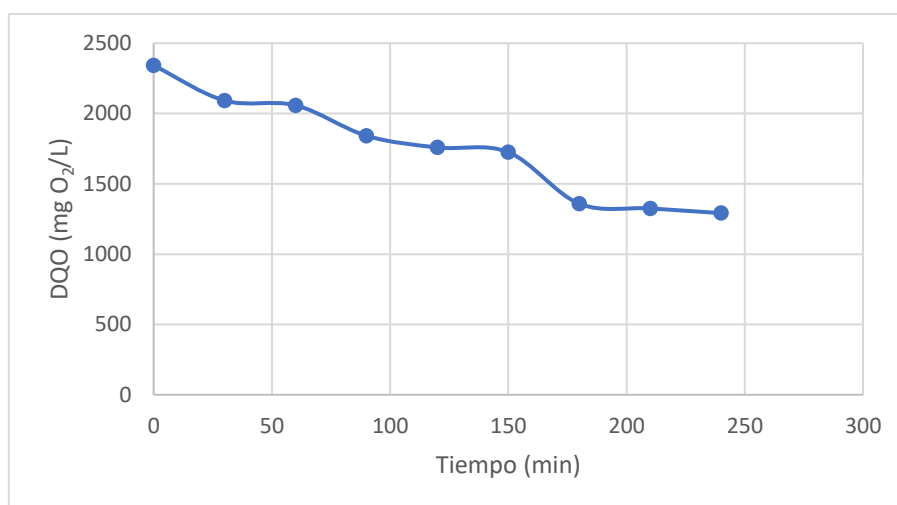
Tiempo (min)	DQO (mg O ₂ /L)
0	2341.6
30	2091.7
60	2058.3
90	1841.7
120	1758.3
150	1725
180	1358.6
210	1325
240	1291.7

Nota. (*) Muestra inicial, antes de la electrocoagulación. Elaboración propia (2023)

En la Figura 38 se observa la evolución temporal de la demanda química de oxígeno, con una tendencia a la mineralización continua, hasta llegar a un valor cercano a 1300 ppm., cuyo valor disminuyó desde un valor por encima de 2300 ppm.

Figura 38

Cinética de la demanda química de oxígeno para una concentración inicial de 500 mg/L de colorante



Como consecuencia de los resultados obtenidos cuyos valores se encuentran por encima de los límites máximos permisibles se procedió a neutralizar el remanente de hierro para disminuir el valor de la DQO; mediante la adición controlada de hidróxido de sodio hasta obtener un pH de 9; el precipitado formado se muestra en la Figura 35.

En la Tabla 12 se muestra la concentración y el porcentaje de remoción de colorante para la solución inicial de 0,5 g/L

Tabla 12

Concentración y porcentaje de remoción para 0,5 g/L de colorante y 100 mg de TiO₂

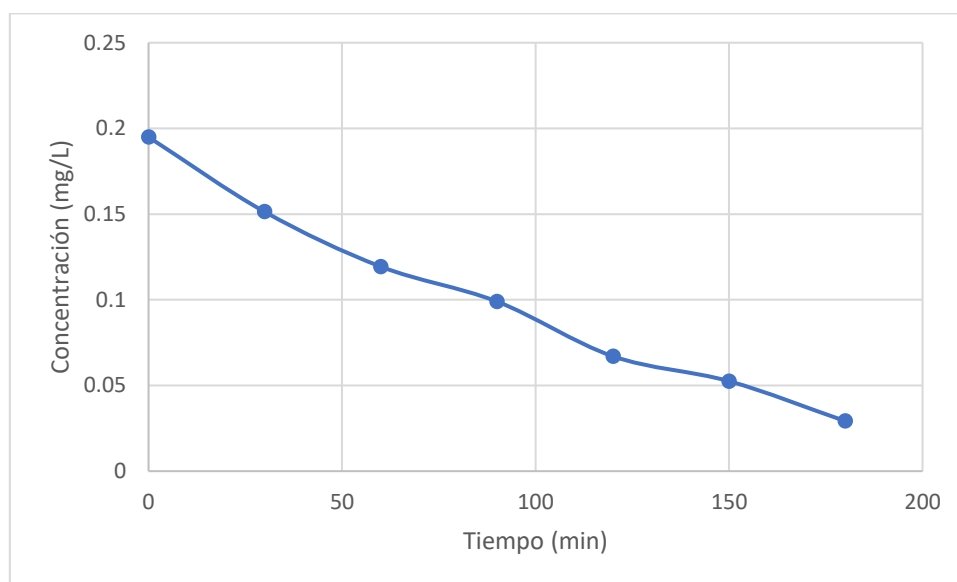
Tiempo (min)	Absorbancia	Concentración (mg/L)	% Remoción
0	0.067	0.19494938	80.50
30	0.052	0.15134232	84.86
60	0.041	0.11936382	88.06
90	0.034	0.09901386	90.09

120	0.023	0.06703535	93.29
150	0.018	0.05249967	94.75
180	0.01	0.02924257	97.07

En la Figura 39 se observa la curva de decaimiento de la concentración de colorante con una tendencia a una cinética de primer orden, con un porcentaje de remoción más elevado que el caso anterior.

Figura 39

Evolución temporal de la concentración de colorante 0,5 g/L de colorante y 100 mg de TiO₂



4.3. Resultado de los tratamientos adicionales

Si bien en ambos casos de las soluciones de colorante de 1 g/L y 0,5 g/L la concentración del colorante medido en términos de intensidad de coloración se había reducido drásticamente, la DBO estaba aún alta, por lo que se procedió a realizar experimentos adicionales; a partir de la solución producto del tratamiento anterior; se mantuvo todas las condiciones de trabajo igual que en los casos anteriores, solo incrementando la concentración de nanopartícula de 100 a 1000 ppm. y midiendo la DQO cada 30 minutos.

Peróxido de hidrógeno 30% volumen: 12 ml/L de agua

Sulfato de hierro: 100 mg/L de agua en forma de sulfato ferroso hidratado

Nanopartícula de dióxido de titanio de 25-50 nm en forma de anatasa: **1000 mg/L**

Tiempo: 180 minutos

Muestreo cada 30 minutos

Temperatura media de 41 °C

Fecha de experimentación

En la Tabla 13 se muestra el porcentaje de remoción de colorante para la solución inicial de 1 g/L y a partir de la segunda electrocoagulación

Tabla 13

Concentración y porcentaje de remoción para 1g/L de colorante y 1000 mg de TiO₂:

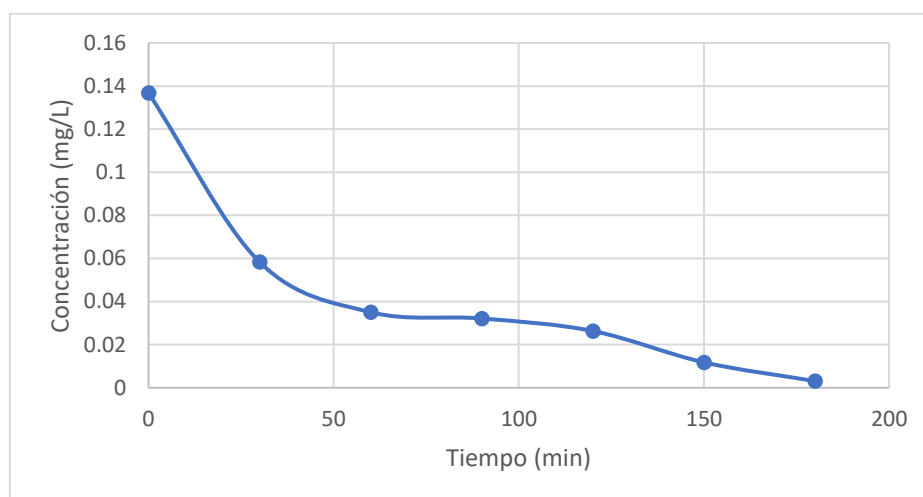
Segunda electrocoagulación

Tiempo (min)	Absorbancia	Concentración (mg/L)	% Remoción
0	0.047	0.13680664	72.63
30	0.02	0.05831394	88.33
60	0.012	0.03505684	92.98
90	0.011	0.03214971	93.57
120	0.009	0.02633543	94.73
150	0.004	0.01179975	97.64
180	0.001	0.00307834	99.38

En la Figura 40 se observa la curva de decaimiento de la concentración de colorante con una tendencia a una cinética de primer orden, con un porcentaje de remoción más elevado que el caso anterior.

Figura 40

Evolución temporal de la concentración de colorante 1 g/L de colorante y 1000 mg de TiO₂: Segunda electrocoagulación



Ahora se procede a cambiar la concentración de la nanopartícula.

En la Tabla 14 se observa la concentración y porcentaje de remoción para 0,5 g/L de colorante y 1000 mg de TiO₂ en función al tiempo.

Tabla 14

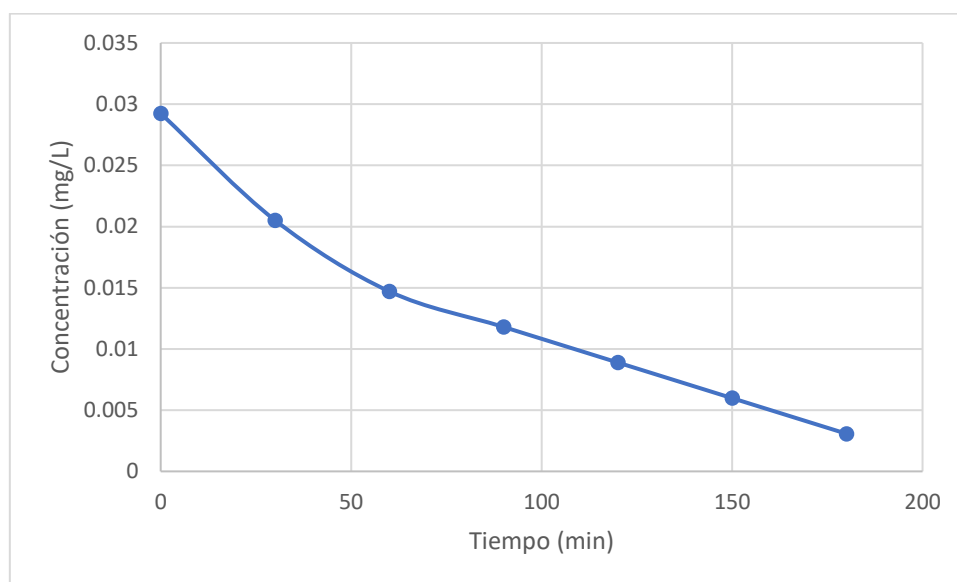
Concentración y porcentaje de remoción para 0,5 g/L de colorante y 1000 mg de TiO₂: Segunda electrocoagulación

Tiempo (min)	Absorbancia	Concentración (mg/L)	% Remoción
0	0.01	0.02924257	94.15
30	0.007	0.02052116	95.89
60	0.005	0.01470689	97.06
90	0.004	0.01179975	97.64
120	0.003	0.00889261	98.22
150	0.002	0.00598547	98.80
180	0.001	0.00307833	99.58

En la Figura 41 se observa la curva de decaimiento de la concentración de colorante con una tendencia a una cinética de primer orden, con un porcentaje de remoción más elevado que el caso anterior.

Figura 41

Evolución temporal de la concentración de colorante 0.5 mg/L de colorante y 1000 mg de TiO₂: Segunda electrocoagulación



El resultado final de los análisis fisicoquímicos de los últimos tratamientos, incluido carbón activado se muestra en la Tabla 15 y 16.

Tabla 15

Resultado de los análisis fisicoquímicos luego de un segundo tratamiento para la concentración de referencia de 1 g/L

Procedencia	Dosificación
1g/L	100 mg de Fe (II)
	12 ml/L de H ₂ O ₂
	pH=3
	TiO ₂ =1000 ppm
Tiempo de tratamiento (horas)	DQO resultante (ppm)
0	2050
0.5	1056.7
1	990
1.5	943.3
2	916.7
2.5	863.3
3	850

En la Figura 42 se observa la evolución temporal de la degradación de la demanda química de oxígeno, hasta llegar a un valor cercano a 800 ppm, cuyo valor disminuyó desde un valor por encima de 2000 ppm.

Figura 42

Cinética de degradación de la DQO para la concentración de referencia de 1 g/L

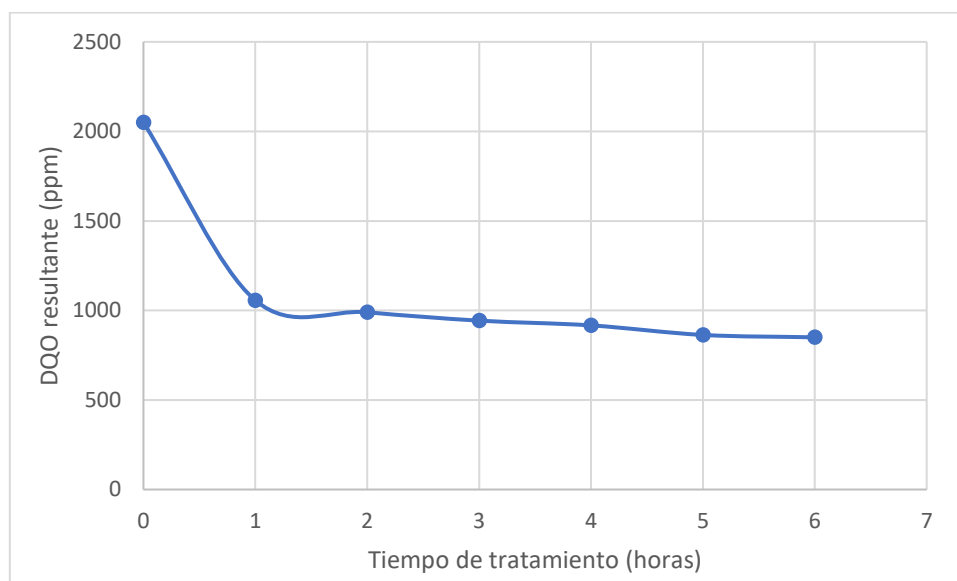


Tabla 16

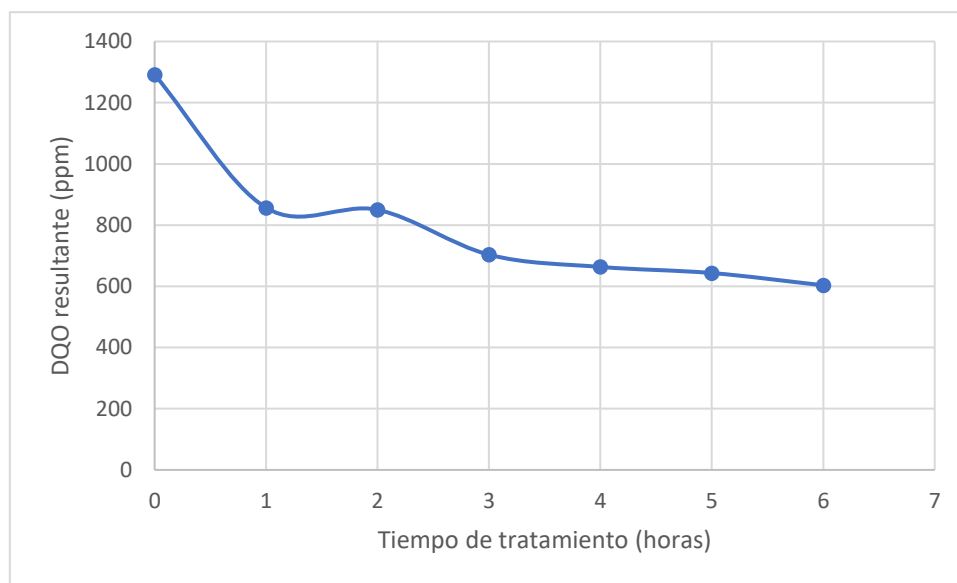
Resultado de los análisis fisicoquímicos luego de un segundo tratamiento para la concentración de referencia de 0,5 g/L

Procedencia		Dosificación
0.5g/L		100 mg de Fe (II)
		12 ml/L de H ₂ O ₂
		pH=3
		TiO ₂ =1000 ppm
Tiempo de tratamiento (horas)		DQO resultante (ppm)
0		1291.7
0.5		856.7
1		850
1.5		703.3
2		663.3
2.5		643.3

En la Figura 43 se observa la evolución temporal de la degradación de la demanda química de oxígeno, hasta llegar a un valor cercano a 600 ppm, cuyo valor disminuyó desde un valor por encima de 1200 ppm.

Figura 43

Cinética de degradación de la DQO para la concentración de referencia de 0,5 g/L



4.4. Respecto al tratamiento de un colorante industrial

Las aguas residuales de los colorantes industriales son mucho más complejas que las que fueron tratadas en el caso de una solución modelo. El agua residual utilizada en el presente estudio, fue proporcionada por una industria textil ubicada en el distrito de Ate y según información del encargado de la planta, esta agua es un agua residual mezclada proveniente de todos los procesos de teñido y está lista para su vertido.

Por información de los ingenieros que operan la planta, esta agua residual industrial contiene los siguientes componentes:

- ✓ Colorantes reactivos, dispersos y directos

- ✓ Pigmentos procedentes del proceso de lavado con índigo e hipoclorito de sodio y bisulfito de sodio
- ✓ Neutralizantes de la soda y carbonatos
- ✓ Enzimas antipilling de desgomado
- ✓ Dispersantes
- ✓ Sal textil.

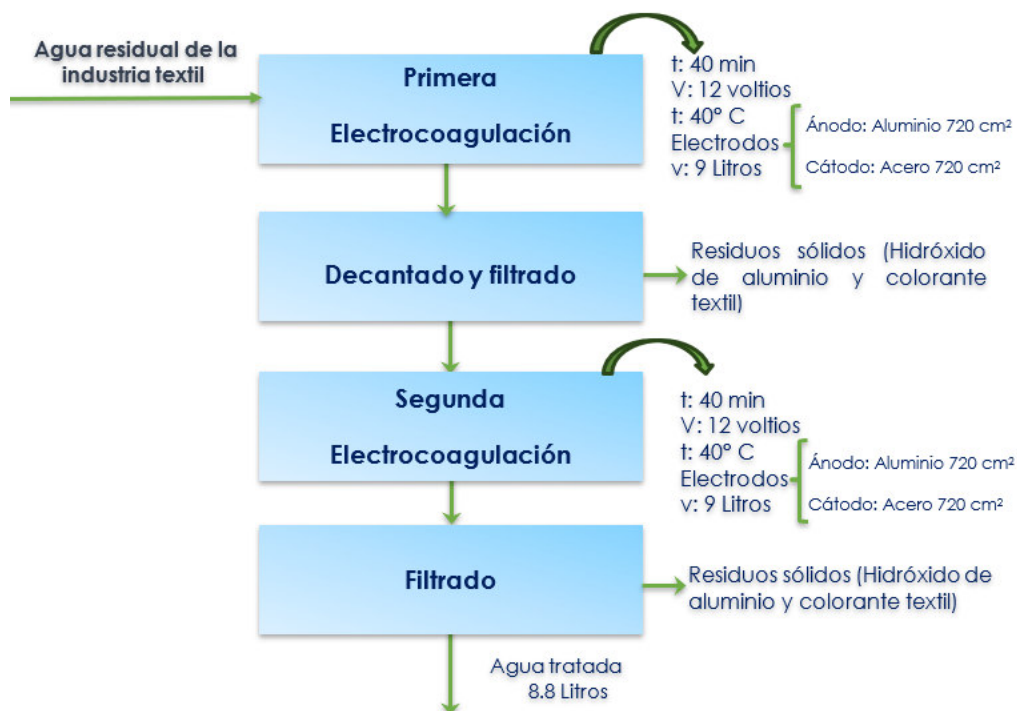
El agua residual suministrada por la empresa es un agua de apariencia clara (sin sólidos en suspensión) pero de color azulado como se muestra en la Figura 45.

El pH inicial del agua residual es de 6 (ligeramente ácido), se tomó una muestra de 10 litros que fue sometida al proceso de electrocoagulación en el fotorreactor.

Las condiciones de operación fueron las mismas que se realizaron con las muestras del colorante *Taicron Red*, la fuente de alimentación con corriente continua de 12 voltios y un tiempo de operación de 40 minutos, se realizaron dos electrocoagulaciones. El diagrama de flujo del proceso general se describe en la Figura 44.

Figura 44

Diagrama de flujo del tratamiento aplicado al agua residual con colorante textil



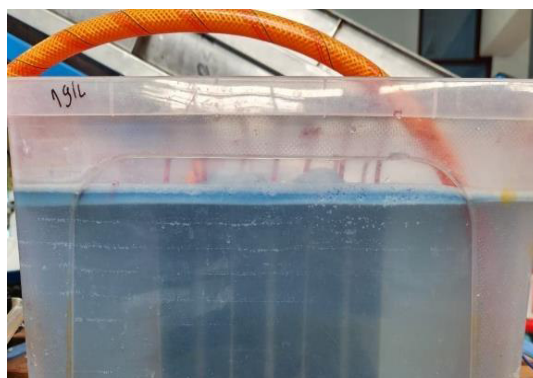
4.4.1. Resultado del tratamiento de la muestra industrial por electrocoagulación

El análisis de la DQO de la muestra original muestra un valor de 1330 ppm.

En la Figura 45 se muestra el proceso de electrocoagulación, utilizando en la celda electrolítica que se dispone para tal fin, la misma que fue utilizada en los casos anteriores.

Figura 45

Celda electrolítica dispuesta para el inicio del proceso de electrocoagulación



Se somete al proceso de electrocoagulación con 3 electrodos de aluminio como ánodo y 4 electrodos de acero como cátodo inerte por un tiempo de 40 minutos a 12 voltios. En la Figura 46 se muestra la evolución del proceso de electrocoagulación, la misma que arrastra parte del colorante en las espumas producidas (floculas de baja densidad)

Figura 46

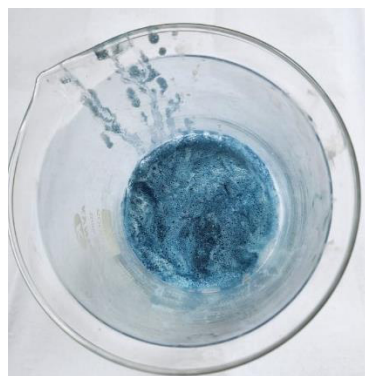
Proceso de electrocoagulación con formación de flóculos ligero y disperso en la solución



Luego de la electrocoagulación se separa el floculo de baja densidad con la finalidad de que el proceso de decantación sea mucho más factible, referido a los flóculos de alta densidad. En la Figura 47 se muestra el flóculo sobrenadante de baja densidad separada de la superficie de la celda electrolítica.

Figura 47

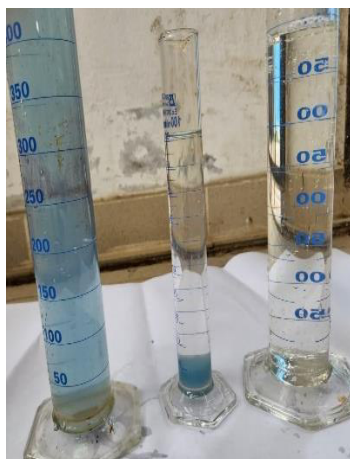
Flóculos sobrenadante expuesto en un vaso de precipitado



Posteriormente se deja decantar en la misma celda electrolítica libre de electrodos donde se obtiene un flóculo de color celeste en el fondo de la celda que consiste básicamente en hidróxido de aluminio ocluida de forma electrostática con el colorante y probablemente con otras sustancias. En la Figura 48 se muestra la solución inicial, la muestra con flóculos decantado y la muestra luego del proceso de filtración.

Figura 48

Muestra original, muestra tratada por electrocoagulación decantada y muestra filtrada



La solución filtrada se pasa a una segunda electrocoagulación con la finalidad de eliminar el colorante remanente y otros contaminantes incoloros presentes en el agua tratada. En la Figura 49 se observa que la espuma aun presenta algo de color; sin embargo, el principal objetivo es flocular los otros componentes del agua residual. Luego del análisis, se obtuvo un DQO de 550 mg/L.

Figura 49

Segunda electrocoagulación del colorante industrial

**Figura 50**

Segunda electrocoagulación del líquido filtrado de la solución



Luego de la electrocoagulación la solución se deja decantar para luego filtrar, tal como se observa en la Figura 50, luego de este proceso se inicia los tratamientos posteriores. Luego de la segunda electrocoagulación se obtuvo una DQO de 540 ppm.

4.4.2. Tratamiento en el reactor solar

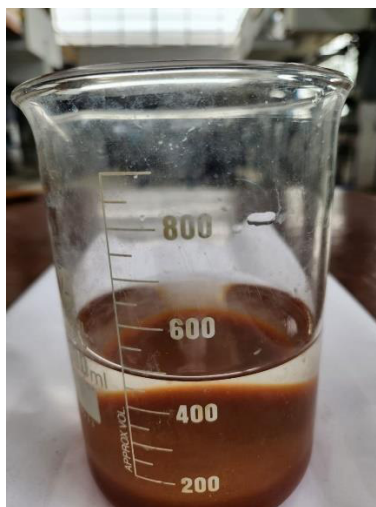
Se acidifica la solución luego se agrega 100 mg de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{SO}_4$ por litro de agua y 12 mL de peróxido de hidrógeno por litro de agua a un pH de 3. Esta prueba se realizó con la finalidad de conocer la efectividad del método fenton en el tratamiento de un agua industrial, tal como se muestra en la Figura 51.

Figura 51

Agua de tratamiento con contenido de hierro y peróxido de hidrógeno



Luego del proceso de tratamiento por 8 horas se neutralizó el hierro remanente utilizando NaOH hasta obtener un pH de 9. Una vez neutralizada la solución, se deja decantar donde se separa las fases Figura 52.

Figura 52*Proceso de decantación*

Luego se filtra y se guarda la solución para el análisis respectivo: Como resultado se obtuvo un valor de DQO equivalente a 488 ppm.

Proceso foto fenton homogéneo

Se procedió de manera similar al anterior y se procedió a hacer el tratamiento en el reactor solar por 3 horas. La solución tratada se modificó el pH a 9 para eliminar el hierro remanente. La solución resultante se separó en dos partes; la primera parte fue etiquetada para el análisis con lo cual se obtuvo un valor de DQO igual a 462 ppm. La segunda porción fue tratada con carbón activado a razón de 2 g/L por 8 horas, luego se filtró y se realizó el análisis. Como resultado de los análisis se obtuvo un DQO de 433 ppm

Proceso foto fenton heterogéneo

Al agua resultante de la segunda electrocoagulación se agrega los reactivos del paso anterior más 1000 mg de nanopartícula por litro de agua; luego se hace el tratamiento en el reactor solar por un periodo de tres horas; luego del análisis se obtuvo una DQO de 430. Posteriormente a

una parte de la muestra se agregó 1 g/L de carbón activado obteniendo una DQO de 425; a la otra porción se agregó 2 g/L de carbón activado obteniendo una DQO de 417 ppm.

Un resumen de los resultados obtenidos es mostrado en la Tabla 17.

Muestra problema: 1330 ppm de DQO

Tabla 17

Resultados de la demanda química de oxígeno de la muestra textil industrial luego del tratamiento combinado

Proceso	Dosificación	DQO ppm
Primera electrocoagulación	Ninguna	550
Segunda electrocoagulación	Ninguna	540
Segunda electrocoagulación + fenton	100 mg de FeSO ₄ .7H ₂ SO ₄ /L 12 ml/L de H ₂ O ₂ y pH=3	488
Segunda electrocoagulación + foto fenton homogéneo	100 mg de FeSO ₄ .7H ₂ SO ₄ /L 12 ml/L de H ₂ O ₂ y pH=3	462
Segunda electrocoagulación + foto fenton homogéneo + carbón activado	100 mg de FeSO ₄ .7H ₂ SO ₄ /L 12 ml/L de H ₂ O ₂ y pH=3 carbón activado: 2 g/L	433
Segunda electrocoagulación + foto fenton heterogéneo	100 mg de FeSO ₄ .7H ₂ SO ₄ /L 12 ml/L de H ₂ O ₂ y pH=3 1000 ppm TiO ₂	430
Segunda electrocoagulación + foto fenton heterogéneo+ carbón activado	100 mg de FeSO ₄ .7H ₂ SO ₄ /L 12 ml/L de H ₂ O ₂ y pH=3 1000 ppm TiO ₂ Carbón activado: 1 g/L	425
Segunda electrocoagulación + foto fenton heterogéneo+ carbón activado	100 mg de FeSO ₄ .7H ₂ SO ₄ /L 12 ml/L de H ₂ O ₂ y pH=3 1000 ppm TiO ₂ Carbón activado: 2 g/L	417

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Analizando nuestros resultados Gilpavas (2020) desarrolló el tratamiento de un efluente industrial de colorante textil con contenido de índigo, cuyo DQO fue de aproximadamente 860 mg/L, cuya toxicidad (mortalidad de la *Artemia salina* fue 100%); demostró que el tratamiento de coagulación química seguido del proceso fenton redujo la DQO en un 75% y una disminución de la toxicidad en un 90%. El colorante industrial utilizado en esta investigación, también con un contenido de colorante azul índigo, tenía una concentración expresada en términos de DQO marcadamente mayor de 1330 ppm; luego del proceso de tratamiento por electrocoagulación y foto fenton heterogéneo se obtuvo una reducción a 430 ppm lo que equivale a 68%. Por otro lado, en términos de disminución de color, la tasa de disminución de color fue del 100%, hecho que se comprueba pues no se obtuvo ninguna lectura de la absorbancia en el espectrofotómetro en ninguna longitud de onda en el rango visible.

Asimismo, Diaz (2021) desarrolló la investigación: “Tratamiento de aguas residuales textiles de la industria textil mediante procesos de oxidación avanzada ($O_3/UV/H_2O_2$) para su vertimiento en la red de alcantarillado” en el cual utilizó los oxidantes ozono, radiación UV y peróxido de hidrógeno; utilizando como variable de control la DQO cuyo valor inicial fue de 108 ppm y obteniendo una degradación del 38% en medio alcalino cuyo pH fue de 8.5; en el presente trabajo, se ha utilizado como tratamiento inicial la electrocoagulación, posteriormente la radiación UV en presencia de nanopartículas de óxido de titanio; las variables de control son la DQO y concentración; los valores iniciales fueron mucho más altos de alrededor de 5000 ppm para la muestra de 1 g/L y 2500 ppm para la muestra de 0,5 g/L de solución modelo; y el agua residual industrial un valor de alrededor de 1330 ppm, luego de los tratamientos con radiación solar a un pH de 3, se eliminó más del 99% del color y alrededor de 75% de la DQO.

En la investigación “Decoloración del agua residual proveniente de la industria textil artesanal por foto Fenton” Huamán (2021), desarrolló el procedimiento de tratamiento de un

agua sintética de colorante textil verde anilina con una concentración de 40 mg/L., una concentración entre 10 y 20 veces menor que la concentración utilizada en el presente trabajo; por tanto, los requerimientos de reactivos fueron proporcional a dicha concentración. Luego de tres horas de exposición a la radiación solar, obtuvo un nivel de decoloración de un 97.5% para los niveles más altos de dosificación de los reactivos; con procedimiento similar usando el proceso foto fenton heterogéneo (inclusión de nanopartículas de dióxido de titanio), se obtuvo una remoción de color de 99.58% y con un tiempo de procesamiento de 3 horas en el reactor solar.

Según Pey (2008) la fotocatalisis heterogénea de TiO_2 es más eficiente para el tratamiento de aguas residuales de tintes cromóforos azo y antraquinona, proporcionando una alta decoloración y reutilización del baño tratado en nuevos tintes. Sin embargo, los tintes que contienen cromóforos de ftalocianina requieren un tratamiento más estricto, como el fotofenton, para degradarlos. Calderón (2019), indica que sus resultados le permitieron confirmar que el tratamiento con fotofenton puede proporcionar baños reutilizables en tinciones posteriores, independientemente del cromóforo del tinte. Todo ello tiene como objetivo impulsar el estudio de las aguas residuales de la industria del refino textil con el objetivo de conseguir ahorros de agua y emisiones en el proceso mediante el uso de tecnología de tratamiento. Los trabajos realizados en este estudio también han conseguido niveles de DQO bastante bajos en el tratamiento de aguas industriales, lo que permite que el agua tratada también pueda ser reutilizada, mezclada con nuevos colorantes y, debido al proceso y tratamiento para depuración, brinda buenas oportunidades para una buena gestión de este recurso.

Kalia et al. (2023) mencionan que la decoloración enzimática (mediada por lacasa) de los tintes sigue siendo ineficaz para los tintes recalcitrantes, que pueden manejarse mejor mediante electrocoagulación (EC). Sin embargo, la EC consume mucha energía y produce una

gran cantidad de lodo. A la luz de lo mismo, el presente estudio ofrece una solución prometedora para el tratamiento de efluentes textiles que cumplen con las normas de descarga superficial, utilizando la hibridación de tratamientos enzimáticos y de electrocoagulación. En consecuencia, según esta investigación este método híbrido enzimático y electrocoagulación es apropiado para el tratamiento de efluentes textiles complejos de manera sostenible con menor consumo de energía y generación de lodos residuales. Sin embargo, se debe tener en consideración que, en el proceso desarrollado en esta tesis, tanto en la electrocoagulación como en el tratamiento en el reactor solar, no genera costo alguno, debido a que la energía se toma directamente de la radiación solar, lo que lo hace bastante más eficiente que este proceso.

VI. CONCLUSIONES

- Se ha logrado diseñar y construir un equipo de electrocoagulación cuya energía proviene de un panel solar, así como un reactor tipo Colector Parabólico Compuesto, para el proceso de foto fenton con radiación solar, el equipo de manera integral permite un tratamiento eficiente de soluciones coloreadas provenientes de la industria textil.
- Las condiciones de operación más favorables para el tratamiento de aguas con colorantes textiles mediante el proceso de electrocoagulación y catálisis solar, tanto en soluciones modelo de 1000 g/L y 500 g/L con *Taicron-red*, como de aguas textiles industriales reales que contienen colorantes y otras sustancias auxiliares, son: para la primera y segunda electrocoagulación, utilizando electrodos de 720 cm² de Acero y Aluminio para el cátodo y ánodo respectivamente, fueron las siguientes: Intensidad de corriente (I), 4 Amperios; voltaje (V), 12 V; tiempo (t) 40 min y pH 7. Para el tratamiento foto fenton con radiación solar las condiciones más favorables se obtuvieron utilizando una solución de H₂O₂ (2 mL/kg); FeSO₄·7H₂O (100 mg/L); nanopartículas de TiO₂ (100 mg/L) a pH 7; t: 180 minutos; Temperatura de 41°C; flujo de 3 (L/min.); radiación solar de 1000 (W/m²) con 2.5 de concentración solar. Asimismo, se evaluó una muestra industrial textil real mediante el mismo proceso y a las mismas condiciones, obteniéndose, 12 V; I 4 A; t (40 min).
- Se ha determinado experimentalmente que la dosis de nanopartícula de dióxido de titanio utilizado como catalizador a la solución modelo de *Taicron Red*, así como al colorante industrial en el proceso de tratamiento, tiene influencia en la remoción de sus principios activos por medio de la tecnología del uso de la radiación solar en la zona UV-Vis.

VII. RECOMENDACIONES

- Debido a los problemas medioambientales, se requiere implementar tecnologías amigables con el medio ambiente, específicamente utilizando fuentes de energía renovable tal como se utilizó en el presente proyecto.
- En base a los resultados obtenidos, es recomendable utilizar el proceso de electrocoagulación, con la finalidad de depurar de manera fácil la mayor cantidad de contaminantes; es más, luego de la electrocoagulación y la eliminación del floculo formado, es recomendable una segunda electrocoagulación.
- Durante la experimentación se ha observado que luego del proceso del tratamiento mediante el proceso foto fenton heterogéneo, la solución final resulta ser ligeramente amarillenta; esto se debe fundamentalmente a la presencia de Fe (III), se recomienda eliminarlo por precipitación con hidróxido de sodio, lo cual permite obtener, tal como indica el diagrama de Pourbaix un óxido férrico fácil de eliminar.

VIII. REFERENCIAS

- Alidadi, H., Anastopoulos, I., Asadi, F., Balouchi, H., Bonyadi, Z., Giannakoudakis, D., Goharshadi, E., Mehrazamir, K., Rezaia, S., Rtimi, S. y Shams, M. (2021). Coupling electrocoagulation and solar photocatalysis for electro- and photo-catalytic removal of carmoisine by Ag/graphitic carbon nitride: Optimization by process modeling and kinetic studies. *Revista de Líquidos Moleculares*, 340 (116917).
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116917>
- Ambrosio, J., Soria, S., Sabás, J. y Toledo, I. (2019). Diseño y construcción de un colector solar de tipo concentrador parabólico compuesto (CPC) para pruebas de calentamiento de aire. *Revista de energía química y física*, 6 (19), 22-30.
https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Energia_Quimica_y_Fisica/vol6num19/Revista_de_Energ%C3%ADa_Qu%C3%ADmica_y_F%C3%ADsica_V6_N19_3.pdf
- Aquino, A. (2017). *Tratamiento de aguas residuales de la industria textil artesanal por fotocátalisis homogénea y heterogénea*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio de la Universidad Nacional del Centro del Perú.
<https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/4606>
- Arango, A. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1), 49–56.
<https://www.redalyc.org/pdf/695/69520109.pdf>
- Alonso, E., García, R. y Onaindia, C. (2011). Campos electromagnéticos y efectos sobre la salud, Departamento de Salud, Gobierno Vasco, España.
https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/salud_amb_campos_electrom/es_def/adjuntos/CEM_cast.pdf

- Ascencio, D. (2011). *Análisis de flujo en un concentrador parabólico compuesto con esferas para fotocatalisis en el instituto de Ingeniería*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio de la Universidad Autónoma de México. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2282/Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Asfaha, Y., Kebede, S., Yohannes, T. y Zewge, F. (2022). Application of hybrid electrocoagulation and electrooxidation process for treatment of wastewater from the cotton textile industry. *ScienceDirect*, 302. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653522011997>
- Atalay, S., Bener, S., Bulca, O. Erzos, G., Palas, B. y Tekin, G. (2019). Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: Effect of operative conditions on the organic carbon removal and kinetic study. *ScienceDirect*, 129, 47 – 54. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582019305208>
- Bilinska, L., Blus, K., Gmurek, M. y Ledakowicz, S. (2019). Coupling of electrocoagulation and ozone treatment for textile wastewater reuse. *ScienceDirect*, 358 992 -1001. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894718320448>
- Bergamasco, R., Buenaventura, R., Espinoza, F., Manenti, R., Módenes, A., Soares, P. y Vilar, V. (2014). Assessment of a multistage system based on electrocoagulation, solar photo-Fenton and biological oxidation processes for real textile wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 252 120–130. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.04.096>
- Bermeo, M. (2017). *Remoción eficiente de colorante refractario azul MNO reactivo en combinación con vinil sulfónico en aguas residuales mediante técnicas de electrocoagulación*

y adsorción. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/6368>.

Bermeo, M. y Tinoco, O. (2016). Remoción de colorantes de efluente sintético de industria textil aplicando tecnología avanzada. *Industrial Data*, 19(2), 91. <https://doi.org/10.15381/idata.v19i2.12844>

Boroski, M., García, J., Hioka, N., Nozaki, J., Rodrigues, A. y Sampaio, L. (2009). Combined electrocoagulation and TiO₂ photoassisted treatment applied to wastewater effluents from pharmaceutical and cosmetic industries. *Journal of Hazardous Materials*, 162(1), 448–454. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.05.062>

Carbajal, H. (2021). *Modelo de sistema de recuperación de aguas grises por fotocatalisis solar con nanopartículas de TiO₂ para riego de cultivos*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/7008>

Calderon, F. y Olortico, S. (2019). *Proceso foto - fenton para la degradación de color del efluente de la industria textil*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio de la Universidad Nacional del Centro del Perú. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5344/T010_46809397_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Campos, C. (2017). *Colorantes usados en textiles artesanales e industriales. Análisis mediante Espectroscopia Raman de anilinas sintéticas* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/146562>

Chaires, I., Proal, J., Salas, H. y Zaruma, P. (2018). Los Colorantes Textiles Industriales Y Tratamientos Óptimos De Sus Efluentes De Agua Residual: Una Breve Revisión.

Revista de La Facultad de Ciencias Químicas del Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango, 19, 38–47.

<https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/quimica/article/view/2216/1506>

Contreras, J. (2022). *Degradación de colorantes en aguas residuales utilizando minerales de óxido de hierro natural como catalizadores*. [Tesis para maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio de la Universidad Nacional de Colombia <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/83915>

Camillioni, I. y Vera, C. (2020), *Ciencias Naturales: La atmósfera*, Universidad de La Plata, Argentina. <https://www.studocu.com/es-ar/document/universidad-nacional-de-la-plata/quimica/informes/la-atmosfera-explora/9628678/view>

Castro, J., Coronel, C., Cortazar, A., Escalante, J., Gonzáles, C y Villagómez, J. (2012). *Biotechnología aplicada a la degradación de colorantes de la industria textil*, 28(2), 187–199. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018629792012000200009&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Davalos, P. y Curicama, F. (2008). *Diseño y construcción de un sistema de aprovechamiento de una piscina con capacidad de 60 m³, con colectores solares planos para la Quinta Carmen*. [Tesis de licenciatura, Escuela Politécnica del Ejercito]. Repositorio de la Escuela Politécnica del Ejercito. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/841>

Dalvi, V., Kalia, S., Kumar, V., Malik, A. y Samuchiwal, S. (2023). Hybrid electrocoagulation and laccase mediated treatment for efficient decolorization of effluent generated from textile industries. *ScienceDirect*.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935123006606>

- Decreto Supremo N° 20 - MINAM (2021). Decreto Supremo que aprueba el Plan de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP) para el periodo 2021-2023. (22 de julio de 2021) <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/2035448-020-2021-minam>
- Deza, E. (2017). *Estudio de catalizadores basados en nanopartículas de TiO₂ para la degradación fotocatalítica del colorante cibacrón navy H-2G presente en efluentes textiles*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio de UNMSM: <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/item/78aabfe7-06ff-47d1-a181-b9e4aa202b01>
- Díaz, Z. (2021). *Tratamiento de aguas residuales textiles de la industria textil mediante procesos de oxidación avanzada (O₃/UV/H₂O₂) para su vertimiento en la red de alcantarillado*. [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional UNFV <https://repositorio.unfv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13084/4833/DIAZ%20CORDOVA%20ZOILA%20MARGARITA%20%20DOCTORADO.pdf?sequence=1&isAlloved=y>
- Duffie, J. y Beckman, W. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Ed. John Wiley and Sons, Inc. http://les.edu.uy/FRS/duffie_beckman.pdf
- Echevarría, C. (2011). *Diseño de un colector parabólico compuesto con aplicación para el calentamiento de agua*. [Tesis de licenciatura, Universidad de Piura]. Repositorio de la Universidad de Piura. https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1389/IME_159.pdf
- El Peruano (2019). Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema

de alcantarillado sanitario. El Peruano.

<https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/decreto-supremo-que-aprueba-el-reglamento-de-valores-maximos-decreto-supremo-n-010-2019-vivienda-1748339-3/>

Fluence News Team. (s.f.). Sólidos Disueltos y Purificación del Agua. Fluence. <https://www.fluencecorp.com/es/purificacion-de-agua-y-solidos-disueltos/>

Gallego, C. y Rubio, A. (2022). Remoción de colorantes en aguas procedentes de la industria textil mediante el uso de biocarbón. Afinidad. *Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*, 79(596), 98–107. <https://doi.org/10.55815/401287>

Garcés, L., Mejía, E. y Santamaría, J. (2004). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista*, 1(1), 83–92. <https://www.redalyc.org/pdf/695/69511013.pdf>

García, C., García, M. y De Plaza, J. (2016). Estudio exploratorio del tratamiento de agua de lavado de tintas por método de electrocoagulación/electroflotación. *Tecnura*, volumen 20 número 47. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/10087>

Gilpavas, E. (2020). *Procesos Avanzados de Oxidación para la degradación de índigo y materia orgánica de aguas residuales de una industria textil*. [Tesis para doctorado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio de la Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78505>

Huamán, K. (2021). *Decoloración del agua residual proveniente de la industria textil artesanal por foto Fenton*. [Tesis para maestría, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio de la Universidad del Centro del Perú. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/7523/T010_72293235_M.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Instituto de Tecnologías Educativas, ITE, (s. f.). Temas ecología: Naturaleza de la radiación solar. Ministerio de Educación, España.

https://fjferrer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion02/1_naturaleza_de_la_radiacin_solar.html

Instituto de Tecnologías Educativas (ITE), (s. f.). Temas ecología: Balance de radiación neta. Ministerio de Educación, España.

https://fjferrer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion02/5_balance_de_radiacin_neta.html

Jiménez, E. y Castellote, M. (2019). La Fotocatálisis En Construcción: Fundamentos Y Métodos De Medida. Grupo ISCMA-IETcc-CSIC. <https://docplayer.es/95379940-La-fotocatalisis-en-construccion-fundamentos-y-metodos-de-medida.html>

Kalogirou, S. (2009). Solar energy engineering, processes, and system Second Edition. Elsevier. https://www.academia.edu/32533754/Solar_Energy_Engineering_Processes_and_Systems_Second_Edition

Laguna, W., Marín, J., Rubiano, C. y Zapata, C. (2005). Estudio sobre las posibilidades de aplicación de la fotocatalisis heterogénea a los procesos de remoción de fenoles en medio acuoso. *Gestión y Ambiente*, 8(1), 105–121. <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169421171002.pdf>

López, A., Pataquiva, A. y Suárez, A. (2016). Electrocoagulation - Photocatalytic process for the treatment of lithographic wastewater. Optimization using response surface methodology (RSM) and kinetic study. *Catalysis Today*, 266, 120–125. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2015.09.016>

López, V. y Crespi, M. (2015). Gestión de los efluentes de la industria textil. Instituto de Investigación Textil y Cooperación Industrial de la Universidad Politécnica de Cataluña, Cuaderno Tecnológico N°18, 1–33. <http://hdl.handle.net/2117/87574>

- Marcano, D. (2018). Introducción a la Química de los Colorantes. Colección Divulgación Científica y Tecnológica. Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales. <http://saber.ucv.vg/bitstream/10872/19390/1/colorantes%20listo%20%2Bisbn.pdf>
- Marín, J., Restrepo, G. y Valencia, S. (2011). Efecto del pH en la Degradación Fotocatalítica de Materia Orgánica Natural. *Información Tecnológica*, 22(5), 57–66. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000500008>
- Medina, A., Tinoco, O. y Zapata, H. (2011). Tratamiento de efluentes textiles con luz ultravioleta solar. *Industrial Data*, 14(2), 9–15. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81622585002>
- Mejía, C. (2013). *Tratamiento de aguas residuales provenientes de un cultivo de tomate contaminadas con Mancozeb y Lambda-Cihalotrina aplicando un proceso de fotocátalisis solar acoplado a un sistema biológico a escala piloto*. [Tesis de pregrado, Universidad del Valle]. Repositorio de la Universidad del Valle. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/7e572d46-ff7f-467d-ad3a-60ea6678d648/content>
- Ministerio del Ambiente. (2019). https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/309381/Plan_Estrat%C3%A9gico_Institucional_MINAM_2019.pdf
- Ministerio para la transición ecología y el reto demográfico, España (2003). <https://www.miteco.gob.es/>
- Miralles, S. (2011). *Aplicación de fotocátalisis solar con baja concentración de TiO₂ como tratamiento terciario en efluentes de EDARs para eliminar microcontaminantes*. [Tesis de maestría, Universidad de Almería]. Repositorio de la Universidad de Almería.

<https://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/471/APLICA~1.PDF?sequence=1&isAllowed=y>

Moya, M. (2011). Tecnologías electroquímicas en el tratamiento de aguas: Electrocoagulación. Instituto Universitario Del Agua y de Las Ciencias Ambientales, 03, 8. <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/86621/1/TemaTECNOLOGIASELECTROQUIMICAS.pdf>

Ortiz, D. (2016). *Aplicación de la fotocatalisis oxidativa con ZnO y luz solar para el tratamiento de agua contaminada con colorantes industriales*. [Tesis de maestría, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio de la Universidad Católica de Santa María. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/server/api/core/bitstreams/5dba680e-a9da-4411-b3ba-fd72be1c2235/content>

Pacheco, M. (2018). *Remediación ambiental: Una alternativa para degradar el colorante azul de metileno por thymus vulgaris y α -diimina*. [Tesis para licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma De Puebla]. Repositorio de la Benemérita Universidad Autónoma De Puebla. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/44344b63-9344-4af0-8df7-8bfba4fd7ba0/content>

Pey, J. (2008). *Aplicación de los procesos de oxidación avanzada (fotocatalisis solar) para el tratamiento y reutilización de efluentes textiles*. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio de la Universidad Politécnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/2241/tesisUPV2816.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Rabl, A. (1976). Comparison of solar concentrators. *Solar Energy*. Vol. 18, pp. 93-111.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0038092X76900438?via%3Dihub>

Sostenibilidad más vida (15 de noviembre de 2023). *Colorantes Azoicos: Qué son y qué efectos*

tienen en la salud. <https://sostenibilidadmasvida.com/sustancias-toxicas/colorantes-azoicos/>

IX. ANEXOS

Anexo A

Perfil de colector parabólico compuesto

En la Tabla 18 se muestran los datos obtenidos mediante la ejecución de los programas que permiten obtener el perfil del colector parabólico compuesto; asimismo, en la Figura 53 se muestra el gráfico desarrollado en el software Autocad, con cuyo diseño fue realizado el corte del material de acero.

Tabla 18

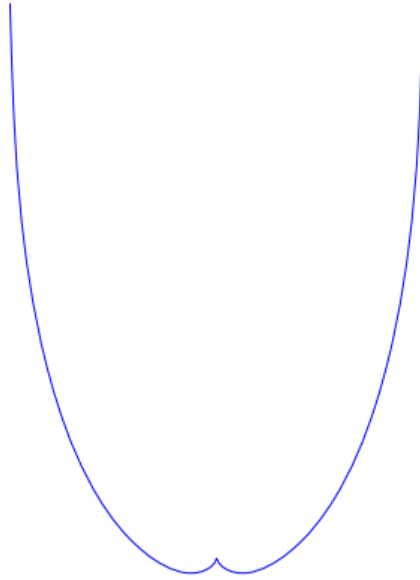
Datos acondicionados de la ejecución de los programas radio.pol, involuta.pol y parábola.pol.

X(cm)	Y(cm)	X(cm)	Y(cm)	X(cm)	Y(cm)	X(cm)	Y(cm)	X(cm)	Y(cm)
1.1	0	0	-1.100878	1.877669	-1.559687	-2.34E-05	-1.1	-1.877669	-1.559688
1.091278	0.1382462	2.34E-05	-1.101712	1.878016	-1.559536	-6.37E-05	-1.100878	-1.878016	-1.559687
1.082954	0.1929022	6.37E-05	-1.102821	1.896944	-1.551251	-0.0001349	-1.101712	-1.896944	-1.559536
1.071894	0.247071	0.0001349	-1.10586	1.934257	-1.534605	-0.0004044	-1.102821	-1.934257	-1.551251
1.041685	0.3534008	0.0004044	-1.107788	1.971774	-1.517448	-0.0006202	-1.10586	-1.971774	-1.534605
1.022613	0.4052934	0.0006202	-1.109986	2.009498	-1.499772	-0.0009015	-1.107788	-2.009498	-1.517448
1.000958	0.4561621	0.0009015	-1.112453	2.047432	-1.481565	-0.001257	-1.109986	-2.047432	-1.499772
0.9767738	0.5058785	0.001257	-1.118185	2.085582	-1.462818	-0.0022248	-1.112453	-2.085582	-1.481565
0.9210711	0.6013552	0.0022248	-1.121446	2.123949	-1.443519	-0.0028541	-1.118185	-2.123949	-1.462818
0.889693	0.6468744	0.0028541	-1.124967	2.162538	-1.423657	-0.0035916	-1.121446	-2.162538	-1.443519
0.8560674	0.6907594	0.0035916	-1.128745	2.201353	-1.403221	-0.0044457	-1.124967	-2.201353	-1.423657
0.8202793	0.7328996	0.0044457	-1.137062	2.240397	-1.382199	-0.0065368	-1.128745	-2.240397	-1.403221
0.7425825	0.811524	0.0065368	-1.141595	2.279675	-1.360579	-0.0077904	-1.137062	-2.279675	-1.382199
0.70087	0.8478097	0.0077904	-1.146372	2.319189	-1.338348	-0.0091934	-1.141595	-2.319189	-1.360579
0.6573871	0.8819537	0.0091934	-1.15139	2.358945	-1.315492	-0.010754	-1.146372	-2.358945	-1.338348
0.6122435	0.9138697	0.010754	-1.162133	2.398945	-1.291999	-0.0143796	-1.15139	-2.398945	-1.315492
0.5174345	0.9707016	0.0143796	-1.16785	2.439194	-1.267855	-0.0164603	-1.162133	-2.439194	-1.291999
0.4680086	0.9954737	0.0164603	-1.173791	2.479695	-1.243045	-0.0187299	-1.16785	-2.479695	-1.267855
0.4174005	1.017731	0.0187299	-1.179952	2.520453	-1.217554	-0.0211961	-1.173791	-2.520453	-1.243045
0.365738	1.037418	0.0211961	-1.192914	2.561472	-1.191367	-0.0267478	-1.179952	-2.561472	-1.217554
0.2597741	1.068886	0.0267478	-1.199705	2.602756	-1.164468	-0.0298481	-1.192914	-2.602756	-1.191367
0.2057404	1.080588	0.0298481	-1.206695	2.644308	-1.136841	-0.0331743	-1.199705	-2.644308	-1.164468
0.151187	1.089561	0.0331743	-1.213879	2.686134	-1.108469	-0.0367335	-1.206695	-2.686134	-1.136841
0.0962517	1.095781	0.0367335	-1.228807	2.728236	-1.079335	-0.0445785	-1.213879	-2.728236	-1.108469
-0.014209	1.099908	0.0445785	-1.236538	2.77062	-1.04942	-0.0488779	-1.228807	-2.77062	-1.079335
-0.0694553	1.097805	0.0488779	-1.244439	2.81329	-1.018706	-0.0534373	-1.236538	-2.81329	-1.04942
-0.1245262	1.092929	0.0534373	-1.252505	2.85625	-0.9871731	-0.0582632	-1.244439	-2.85625	-1.018706
-0.1792825	1.085292	0.0582632	-1.269101	2.899504	-0.9548021	-0.0687395	-1.252505	-2.899504	-0.9871731
-0.2872993	1.061819	0.0687395	-1.277618	2.943057	-0.9215723	-0.0744021	-1.269101	-2.943057	-0.9548021
-0.3402869	1.046042	0.0744021	-1.286272	2.986913	-0.8874621	-0.0803555	-1.277618	-2.986913	-0.9215723
-0.3924149	1.027624	0.0803555	-1.295055	3.031077	-0.8524497	-0.0866054	-1.286272	-3.031077	-0.8874621
-0.4435516	1.006609	0.0866054	-1.312982	3.075553	-0.8165122	-0.1000171	-1.295055	-3.075553	-0.8524497
-0.5423374	0.957011	0.1000171	-1.32211	3.120346	-0.7796259	-0.1071894	-1.312982	-3.120346	-0.8165122
-0.5897369	0.9285529	0.1071894	-1.331338	3.165461	-0.7417665	-0.1146796	-1.32211	-3.165461	-0.7796259
-0.6356466	0.897749	0.1146796	-1.340658	3.210902	-0.7029086	-0.1224926	-1.331338	-3.210902	-0.7417665
-0.6799507	0.8646774	0.1224926	-1.359541	3.256673	-0.663026	-0.1391056	-1.340658	-3.256673	-0.7029086
-0.7632983	0.7920705	0.1391056	-1.369088	3.302781	-0.6220916	-0.1479147	-1.359541	-3.302781	-0.663026
-0.8021314	0.7527186	0.1479147	-1.378694	3.349229	-0.5800772	-0.1570645	-1.369088	-3.349229	-0.6220916
-0.8389382	0.7114652	0.1570645	-1.388352	3.396022	-0.5369536	-0.166559	-1.378694	-3.396022	-0.5800772
-0.8736257	0.6684146	0.166559	-1.407784	3.443166	-0.4926906	-0.1865976	-1.388352	-3.443166	-0.5369536
-0.9362982	0.577361	0.1865976	-1.417542	3.490665	-0.4472569	-0.1971488	-1.407784	-3.490665	-0.4926906
-0.9641247	0.529588	0.1971488	-1.427315	3.538524	-0.4006199	-0.208059	-1.417542	-3.538524	-0.4472569
-0.9895159	0.4804772	0.208059	-1.437096	3.586749	-0.3527459	-0.2193315	-1.427315	-3.586749	-0.4006199
-1.012407	0.4301527	0.2193315	-1.456641	3.635344	-0.3035999	-0.2429743	-1.437096	-3.635344	-0.3527459
-1.050467	0.3263737	0.2429743	-1.466388	3.684315	-0.2531455	-0.25535	-1.456641	-3.684315	-0.3035999
-1.065538	0.2731813	0.25535	-1.476105	3.733666	-0.201345	-0.2680982	-1.466388	-3.733666	-0.2531455
-1.077918	0.2192989	0.2680982	-1.485782	3.783404	-0.148159	-0.2812211	-1.476105	-3.783404	-0.201345
-1.087575	0.1648625	0.2812211	-1.504981	3.833533	-0.093547	-0.3085986	-1.485782	-3.833533	-0.148159
-1.09863	0.054879	0.3085986	-1.514484	3.884058	-0.0374666	-0.3228562	-1.504981	-3.884058	-0.093547
-1.1	-0.0003904	0.3228562	-1.523908	3.934985	0.0201273	-0.337495	-1.514484	-3.934985	-0.0374666
-1.098591	-0.0556588	0.337495	-1.533246	3.986319	0.0792265	-0.3525158	-1.523908	-3.986319	0.0201263
-1.094407	-0.1107866	0.3525158	-1.55162	4.038066	0.1400346	-0.3837072	-1.533246	-4.038066	0.0792275
-1.077762	-0.220064	0.3837072	-1.560637	4.09023	0.2024472	-0.3998787	-1.55162	-4.09023	0.1400346

-1.065344	-0.2739376	0.3998787	-1.569527	4.142818	0.2665669	-0.4164345	-1.560637	-4.142818	0.2024472
-1.050235	-0.3271192	0.4164345	-1.57828	4.195835	0.3324474	-0.4333745	-1.569527	-4.195835	0.2665669
-1.032472	-0.3794745	0.4333745	-1.595337	4.249285	0.4001447	-0.468406	-1.57828	-4.249285	0.3324474
-0.9891746	-0.4811795	0.468406	-1.603621	4.303175	0.4697172	-0.4864964	-1.595337	-4.303175	0.4001447
-0.9637486	-0.5302723	0.4864964	-1.611728	4.35751	0.5412257	-0.5049688	-1.603621	-4.35751	0.4697172
-0.9358881	-0.5780255	0.5049688	-1.619648	4.412295	0.6147336	-0.523822	-1.611728	-4.412295	0.5412257
-0.9056635	-0.6243186	0.523822	-1.634888	4.467535	0.6903071	-0.5626653	-1.619648	-4.467535	0.6147336
-0.8384329	-0.7120606	0.5626653	-1.642187	4.523236	0.7680153	-0.5826521	-1.634888	-4.523236	0.6903071
-0.8015969	-0.7532878	0.5826521	-1.649259	4.579403	0.8479303	-0.603013	-1.642187	-4.579403	0.7680153
-0.7627359	-0.7926121	0.603013	-1.656095	4.636041	0.9301273	-0.6237458	-1.649259	-4.636041	0.8479303
-0.7219482	-0.8299342	0.6237458	-1.669015	4.693155	1.014685	-0.666317	-1.656095	-4.693155	0.9301273
-0.6350092	-0.8982	0.666317	-1.675079	4.750751	1.101686	-0.6881497	-1.669015	-4.750751	1.014685
-0.5890776	-0.9289712	0.6881497	-1.680866	4.808832	1.191216	-0.7103432	-1.675079	-4.808832	1.101686
-0.5416579	-0.9573958	0.7103432	-1.686366	4.867404	1.283366	-0.7328939	-1.680866	-4.867404	1.191216
-0.49287	-0.9834018	0.7328939	-1.696466	4.92647	1.378228	-0.7790528	-1.686366	-4.92647	1.283366
-0.3916854	-1.027902	0.7790528	-1.701046	4.986037	1.475903	-0.8026531	-1.696466	-4.986037	1.378228
-0.3395443	-1.046284	0.8026531	-1.7053	5.046107	1.576493	-0.8265949	-1.701046	-5.046107	1.475903
-0.2865455	-1.062022	0.8265949	-1.709218	5.106685	1.680107	-0.850874	-1.7053	-5.106685	1.576493
-0.2328229	-1.075078	0.850874	-1.716008	5.167774	1.786858	-0.9004244	-1.709218	-5.167774	1.680107
-0.1237504	-1.093017	0.9004244	-1.718861	5.229378	1.896866	-0.9256857	-1.716008	-5.229378	1.786858
-0.0686761	-1.097854	0.9256857	-1.72134	5.2915	2.010255	-0.951264	-1.718861	-5.2915	1.896866
-0.0134283	-1.099918	0.951264	-1.723435	5.354143	2.127158	-0.9771538	-1.72134	-5.354143	2.010255
0.0418535	-1.099203	0.9771538	-1.726439	5.417308	2.247712	-1.029844	-1.723435	-5.417308	2.127158
0.1519604	-1.089453	1.029844	-1.727329	5.480997	2.372062	-1.056633	-1.726439	-5.480997	2.247712
0.2065074	-1.080442	1.056633	-1.727799	5.545213	2.500361	-1.083708	-1.727329	-5.545213	2.372062
0.2605327	-1.068701	1.083708	-1.727841	5.609955	2.63277	-1.111064	-1.727799	-5.609955	2.500361
0.3139	-1.054261	1.111064	-1.726603	5.675224	2.769458	-1.166588	-1.727841	-5.675224	2.63277
0.4181228	-1.017435	1.166588	-1.725306	5.741018	2.910602	-1.194743	-1.726603	-5.741018	2.769458
0.4687151	-0.9951413	1.194743	-1.723546	5.807337	3.056392	-1.223149	-1.725306	-5.807337	2.910602
0.5181234	-0.970334	1.223149	-1.721315	5.874178	3.207025	-1.251799	-1.723546	-5.874178	3.056392
0.5662229	-0.9430756	1.251799	-1.715406	5.941538	3.362711	-1.3098	-1.721315	-5.941538	3.207025
0.6580129	-0.8814868	1.3098	-1.711713	6.009412	3.52367	-1.339134	-1.715406	-6.009412	3.362711
0.7014716	-0.8473119	1.339134	-1.707516	6.077795	3.690137	-1.36868	-1.711713	-6.077795	3.52367
0.7431584	-0.8109967	1.36868	-1.702808	6.14668	3.862358	-1.398428	-1.707516	-6.14668	3.690137
0.7829678	-0.7726328	1.398428	-1.69183	6.216059	4.040594	-1.458496	-1.702808	-6.216059	3.862358
0.8565575	-0.6901516	1.458496	-1.685545	6.28592	4.225123	-1.488799	-1.69183	-6.28592	4.040594
0.8901519	-0.6462427	1.488799	-1.678721	6.356253	4.416238	-1.519267	-1.685545	-6.356253	4.225123
0.9214977	-0.6007012	1.519267	-1.67135	6.427044	4.614249	-1.549892	-1.678721	-6.427044	4.416238
0.9505157	-0.5536424	1.549892	-1.654942	6.498276	4.819488	-1.611573	-1.67135	-6.498276	4.614249
1.001281	-0.4554514	1.611573	-1.645892	6.569931	5.032305	-1.642609	-1.654942	-6.569931	4.819488
1.0229	-0.4045674	1.642609	-1.636269	6.641988	5.253073	-1.673761	-1.645892	-6.641988	5.032305
1.041936	-0.3526613	1.673761	-1.626069	6.714422	5.482188	-1.70502	-1.636269	-6.714422	5.253073
1.058339	-0.2998644	1.70502	-1.603911	6.787206	5.720072	-1.767813	-1.626069	-6.787206	5.482188
1.08309	-0.1921335	1.767813	-1.591942	6.860308	5.967175	-1.799327	-1.603911	-6.860308	5.720072
1.091376	-0.1374715	1.799327	-1.579373	6.933694	6.223977	-1.830903	-1.591942	-6.933694	5.967175
1.096905	-0.0824623	1.830903	-1.559686	7.007322	6.49099	-1.877667	-1.579373	-7.007322	6.223977
1.1	1.62E-05	1.877667	-1.559688	7.081149	6.768762	-1.877668	-1.559686	-7.081149	6.49099
				7.155123	7.057876	-1.877668	-1.559688	-7.155123	6.768762
				7.229188	7.358959			-7.229188	7.057876
				7.30328	7.672683			-7.30328	7.358959
				7.377327	7.999766			-7.377327	7.672683
				7.45125	8.340981			-7.45125	7.999766
				7.524958	8.697158			-7.524958	8.340981
				7.598352	9.069191			-7.598352	8.697158
				7.67132	9.458043			-7.67132	9.069191
				7.743735	9.86475			-7.743735	9.458043
				7.815457	10.29043			-7.815457	9.86475
				7.886329	10.73631			-7.886329	10.29043
				7.956176	11.20368			-7.956176	10.73631
				8.024801	11.69398			-8.024801	11.20368
				8.091982	12.20874			-8.091982	11.69398
				8.157473	12.74964			-8.157473	12.20874
				8.220996	13.31851			-8.220996	12.74964
				8.28224	13.91735			-8.28224	13.31851
				8.340857	14.54832			-8.340857	13.91735
				8.396451	15.21381			-8.396451	14.54832
				8.448582	15.91642			-8.448582	15.21381
				8.49675	16.65901			-8.49675	15.91642
				8.540393	17.44473			-8.540393	16.65901
				8.578875	18.27705			-8.578875	17.44473
				8.611477	19.15979			-8.611477	18.27705
				8.637383	20.09719			-8.637383	19.15979
				8.655669	21.09394			-8.655669	20.09719
				8.665235	22.14501			-8.665235	21.09394

Figura 53

Perfil del colector parabólico compuesto para el corte en acero inoxidable por tecnología laser



Nota. Gráfico de perfil parabólico compuesto para el corte de acero, obtenido con el software Autocad. Elaboración propia (2023).

Anexo B

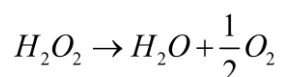
Cálculo de la concentración molar del peróxido de hidrógeno al 30% en volumen

Base de cálculo 100 ml de peróxido de hidrógeno al 30% en peso

$$V_{O_2} = \frac{nRT}{P} = \frac{(30/34)}{2 \times 0.1} \times 0.082 \times 298.15 = 108 L$$

, puesto que la descomposición del agua

oxigenada procede del siguiente modo:



Por tanto, el agua oxigenada de 30% en volumen significa que es capaz de producir 108 litros de oxígeno molecular, que de forma redondeada es de 110 litros de oxígeno, cuya denominación comercial es de 110 volúmenes.

Por otro lado, la concentración molar de peróxido de hidrógeno en el agua oxigenada es:

$$n_{H_2O_2} = \frac{(30/34)}{0.1} = 8.82 mol / L$$

Anexo C

Determinación de la curva patrón del colorante “taicron-red” en el espectrofotómetro UV-

Vis.

Para la lectura de la concentración de colorante, en términos de intensidad de color, previamente se preparó muestras de 0,5, 0,5/2, 0,5/4, 0,5/8, 0,5/16, 0,5/32, 0,5/64 y 0,5/128 g/L de colorante *taicron-red*, lo cual permite obtener la curva patrón. Para determinar cuál es la longitud de onda apropiada se hace la lectura de la muestra cuya concentración se encuentra entre los valores máximo y mínimo con lo cual se construye la Tabla 19.

Tabla 19

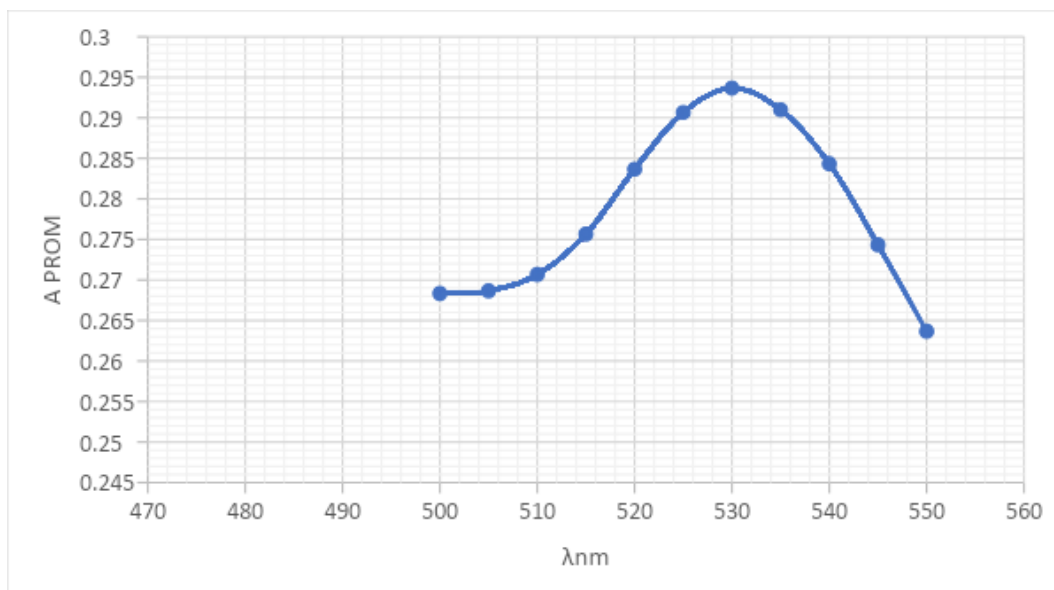
Absorbancia de la muestra de concentración media en función a la longitud de onda

λ nm	A1	A2	A3	T%	A PROM
500	0.268	0.268	0.269	54	0.26833
505	0.268	0.269	0.269	53.9	0.26867
510	0.27	0.271	0.271	53.7	0.27067
515	0.275	0.276	0.276	53.1	0.27567
520	0.283	0.284	0.284	52.1	0.28367
525	0.29	0.291	0.291	51.3	0.29067
530	0.293	0.294	0.294	50.9	0.29367
535	0.291	0.291	0.291	51.2	0.29100
540	0.284	0.285	0.284	52	0.28433
545	0.274	0.275	0.274	53.2	0.27433
550	0.263	0.264	0.264	54.5	0.26367

Con estos datos se construye la siguiente Figura 54 que muestra la longitud de onda requerida para la lectura de datos.

Figura 54

Esquema para la determinación de la longitud de onda de lectura de datos

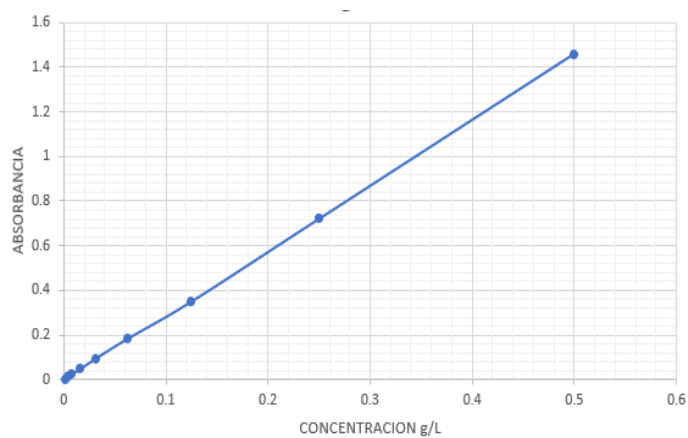


Una vez fijada la longitud de onda de 530 nanómetros, se procede a realizar la lectura correspondiente de las muestras patrón y se obtiene la curva patrón requerida para la lectura de la muestra problema, tal como se observa en la Figura 55.

Figura 55

Datos y gráfica de la curva patrón para la determinación la concentración de la muestra problema

CONCENTRACIÓN	ABSORBANCIA
0.00195313	0.001
0.00390625	0.014
0.0078125	0.028
0.015625	0.048
0.03125	0.096
0.0625	0.185
0.125	0.351
0.25	0.721
0,5	1.459



Anexo D

Espectros IR del colorante textil

Para conocer los principales grupos funcionales del colorante taicron-red se realizó una corrida en el espectrofotómetro IR, cuyos espectros para diversas concentraciones son mostrados en las Figuras 56, 57 y 58. Puede observarse que la intensidad de los espectros disminuye conforme se aplica uno u otro tratamiento, lo que indica de manera cualitativa, la tasa de disminución de la concentración de colorante.

Figura 56

Espectro IR de la muestra original de 0,5 g/L

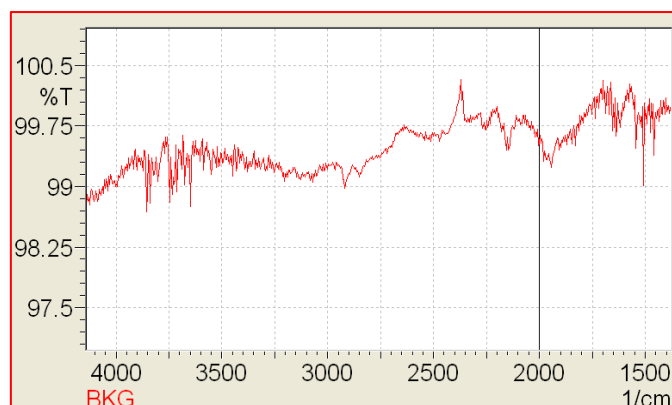


Figura 57

Espectro IR de la muestra después de la segunda electrocoagulación de la muestra de 0,5 g/L

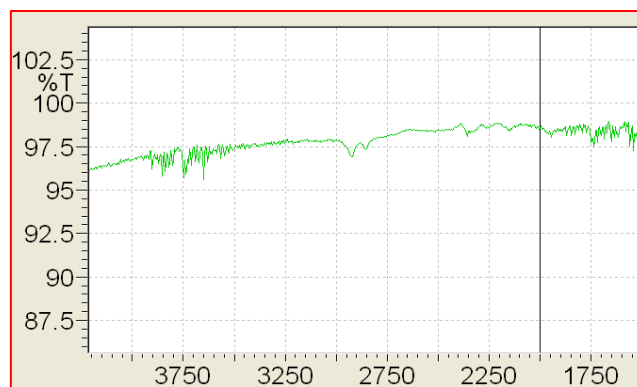
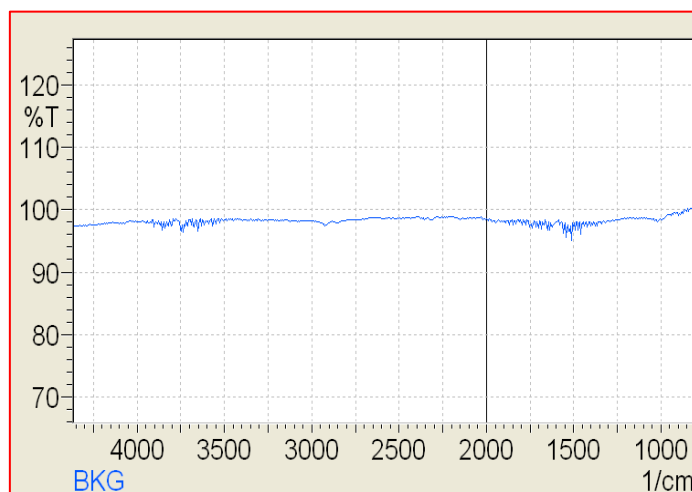


Figura 58

Espectro IR de la muestra después del tratamiento con el fotorreactor de la muestra de 0,5 g/L



En la Figura 59 se observa la lectura de la absorbancia de las muestras conteniendo las soluciones de concentración conocida para la construcción de la curva patrón, así como de la muestra problema en el espectrofotómetro UV-Vis que permitió determinar sus respectivas concentraciones.

Figura 59

Lectura de datos en el espectrofotómetro UV-Vis.



Anexo E

Difracción de la luz láser en presencia de nanopartículas.

Cuando se lleva a cabo el procedimiento experimental utilizando nanopartículas de dióxido de titanio, aun después del filtrado el agua tratada contiene dichas partículas, la cual se observa en la Figura 60.

Figura 60

Difracción de luz láser debido a la presencia de nanopartículas de dióxido de titanio



Sin embargo, una vez concluido el proceso en el reactor solar, se procede a elevar el pH para neutralizar el hierro del tratamiento foto fenton, este precipita y enmascara a las nanopartículas de dióxido de titanio y en consecuencia después del filtrado no se observa la difracción de la figura anterior lo que indica ausencia de la nanopartícula después del proceso final, tal como se observa en la Figura 61.

Figura 61

Ausencia de difracción de luz laser luego de la precipitación del hierro



Anexo F

Intensidad de radiación solar

En la Figura 62 se observa el piranómetro digital utilizado para medir la intensidad de radiación solar dada durante los días que duró el procedimiento experimental. El equipo se instala en un punto donde no haya interferencia como sombras por la inclinación de los rayos solares. Previamente se realiza la programación para que el equipo capture los datos, expresados en (Watts/m²) en un intervalo de tiempo especificado, los mismos que son almacenados en un puerto USB.

Figura 62

Piranómetro

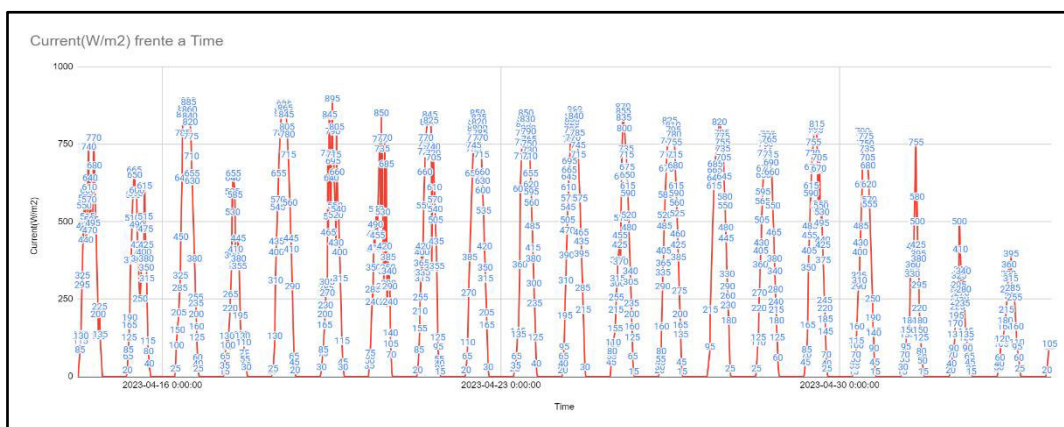


En la Figura 63 se observa el espectro de radiación solar ocurrida entre los días 04 de abril y 30 de abril del 2023, cuyo valor máximo fluctúa entre 770 y 890 W/m²; este valor es de 1367 W/m² según la escala del *World Radiation Reference Centre* (WRRC), y 1373 W/m²

según la Organización Mundial de Meteorología (OMM), es decir los días donde se realizó la experimentación, el valor registrado fue alrededor de 50% del valor máximo.

Figura 63

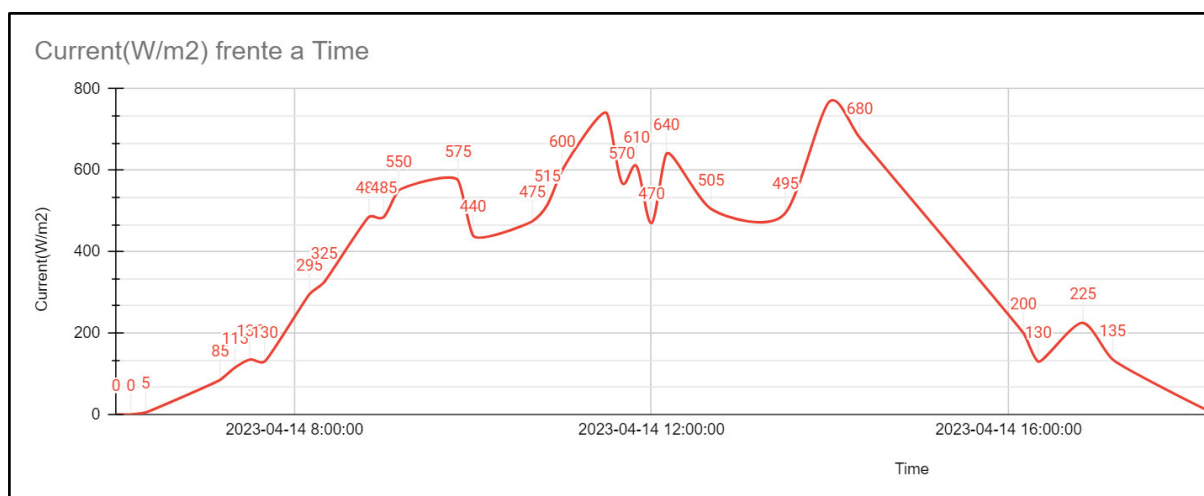
Espectro de la radiación solar del 16 de abril a 30 de abril del 2023



En la Figura 64 se observa el espectro de la radiación solar ampliada para visualizar de mejor forma los cambios de intensidad durante un solo día; esta figura se obtiene por rebatimiento y ampliación de los datos registrados en la Figura 63, correspondiente al día 14 de abril.

Figura 64

Espectro de radiación solar ampliada del día 14 de abril



Anexo G

Resultados del análisis químico



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA
LABORATORIO DE SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICO (LASAQ)



INFORME DE ENSAYOS LASAQ N° 064-2023-DQ

SOLICITANTE : LIA ELIS CONCEPCIÓN GAMARRA
 DNI 08645145157
 BLASCO IBÁÑEZ 538 URB. INGENIERIA -
 SSN MARTÍN DE PORRES

PRODUCTO DECLARADO : Aguas Residuales Industria de textiles

NÚMERO DE MUESTRAS : 16

CANTIDAD RECIBIDA : 1.0 L

MARCA : sin marca

FORMA DE PRESENTACIÓN : botella de plástico

MUESTREADO POR : Muestra proporcionada por el solicitante.

FECHA DE RECEPCIÓN : 19 de abril del 2023

FECHA DE ENTREGA DE RESULTADO : 24 de abril del 2023

ENSAYOS SOLICITADOS : FÍSICO/QUÍMICO

ENSAYOS	RESULTADOS	
	CODIGOS	DQO mg/L
1.-Demanda Química de Oxígeno DQO mg/L	M1	5216.7
	M2	4683.0
	M3	3950.0
	M4	3716.7
	M5	2383.3
	M6	2316.7
	M7	2050.0
	M8	2341.6
	M9	2091.7
	M10	2058.3
	M11	1841.7
	M12	1758.3
	M13	1725.0
	M14	1358.6
	M15	1325.0
	M16	1291.7

MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO:
 1.- Standard Methods 20th Edition 4500-H+

Atentamente:

Mg.Sc. Diego Suarez Ramos
**JEFE DEL LABORATORIO DE
 ANÁLISIS QUÍMICO**

Dr. Víctor Caro Sánchez Barrios
 Director Depto. Académico de Química
 Dr. Víctor Caro-Sánchez Barrios
**DIRECTOR DEL DEPARTAMENTO
 ACADÉMICO DE QUÍMICA**



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA
LABORATORIO DE SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICO (LASAQ)



INFORME DE ENSAYOS
LASAQ N° 06B-2023-DQ

SOLICITANTE : LIA ELIS CONCEPCIÓN GAMARRA
DNI 08645145157
BLASCO IBÁÑEZ 538 URB. INGENIERIA –
SSN MARTIN DE PORRES

PRODUCTO DECLARADO : Aguas Residuales Industria de textiles
NÚMERO DE MUESTRAS : 12
CANTIDAD RECIBIDA : 1.0 L
MARCA : sin marca
FORMA DE PRESENTACIÓN : botella de plástico
MUESTREADO POR : Muestra proporcionada por el solicitante
FECHA DE RECEPCIÓN : 02 de mayo del 2023
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADO: 12 de mayo del 2023
ENSAYOS SOLICITADOS : FÍSICO QUÍMICO

ENSAYOS	RESULTADOS			
	CÓDIGOS	DQO mg/L	pH Inicial	pH final
1.-Demanda Química de Oxígeno DQO mg/L	M1	943.3	6.8	2.81
	M2	990.0	6.4	2.75
	M3	850.0	6.73	2.84
	M4	863.3	6.42	2.76
	M5	850.0	5.93	2.85
	M6	603.3	11.91	2.87
	M7	703.3	11.36	2.87
	M8	916.7	10.77	2.86
	M9	1056.7	10.96	2.85
	M10	643.3	12.12	2.90
	M11	663.3	3.05	2.84
	M12	856.7	3.27	2.87

MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO:

1.- Standard Methods 20th Edition 4506-H

Atentamente:

Mg. Sc. Diego Suarez Ramos
JEFE DEL LABORATORIO DE
ANÁLISIS QUÍMICO

Dr. Victor Cano Sánchez Benites
Director Depto. Académico de Química
Dr. Víctor Cano Sánchez Benites
DIRECTOR DEL DEPARTAMENTO
ACADÉMICO DE QUÍMICA



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA
LABORATORIO DE SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICO (LASAQ)



INFORME DE ENSAYOS
LASAQ N° 09-2023-DQ

SOLICITANTE : *Lia Elis Concepción Gamarra*
Blasco Ibáñez 538 Urb. Ingeniería-San Martín de Porres

PRODUCTO DECLARADO : *Aguas Residuales Industria de textiles*

NÚMERO DE MUESTRAS : *09*

CANTIDAD RECIBIDA : *500 ml*

MARCA : *sin marca*

FORMA DE PRESENTACIÓN : *botella de plástico*

MUESTREADO POR : *Muestra proporcionada por el solicitante.*

FECHA DE RECEPCIÓN : *22 de mayo del 2023*

FECHA DE ENTREGA DE RESULTADO: *05 de junio del 2023*

ENSAYOS SOLICITADOS : *FÍSICO-QUÍMICO*

ENSAYOS	RESULTADOS			
	CÓDIGOS	DQO mg/L	pH Inicial	pH final
1.-Demanda Química de Origeno DQO mg/L	1	1330.0	6.41	2.98
	2	433.0	6.25	2.95
	3	550.0	6.47	2.93
	4	430.0	7.7	2.94
	5	540.0	10.97	2.92
	6	417.0	8.6	2.98
	7	462.0	8.17	2.86
	8	448.0	8.31	2.92
	9	425.0	7.64	2.9

MÉTODOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO:
 1.- Standard Methods 20th Edition 4500-H+

Atentamente:


 Mg.Sc. Diego Suarez Ramos
**JEFE DEL LABORATORIO DE
 ANÁLISIS QUÍMICO**


DIRECCIÓN
 Dr. Victor Caro Sánchez Benites
 Director Dpto. Académico de Química
**DIRECTOR DEL DEPARTAMENTO
 ACADÉMICO DE QUÍMICA**

Anexo H

Matriz de consistencia

Condiciones favorables de operación para la remoción del colorante textil disperso Taicron Red de una solución modelo mediante el proceso combinado de electrocoagulación y catálisis solar.

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGIA
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable dependiente	
¿Cuáles deben ser las condiciones de operación favorables para la remoción del colorante textil disperso "Taicron Red" mediante el proceso combinado de electrocoagulación y catálisis solar?	Determinar las condiciones de operación favorables para la remoción del colorante textil disperso "Taicron Red" mediante el proceso combinado de electrocoagulación y catálisis solar.	Las condiciones de operación desarrolladas en este proceso permiten remover el colorante textil disperso "Taicron Red" y el colorante de un agua residual industrial utilizando el proceso combinado de electrocoagulación y catálisis solar.	Remoción del colorante textil Dimensiones Porcentaje de remoción	
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable independiente	Tipo de investigación:
¿Qué características deberá presentar el equipo de tratamiento de efluentes textiles mediante el proceso combinado de electrocoagulación y catálisis solar para la remoción del colorante textil "Taicron Red"?	Construir un equipo de tratamiento de efluentes textiles mediante el proceso combinado de electrocoagulación y catálisis solar para la remoción del colorante textil "Taicron Red", utilizando una fuente de energía renovable.	Las características de diseño y construcción del equipo de tratamiento de efluentes textiles mediante el proceso combinado de electrocoagulación y catálisis solar permitirán la remoción del colorante textil "Taicron Red"	Condiciones de operación favorables	Cuantitativa
¿Cuáles son las condiciones de operación de la remoción del colorante textil Taicron Red mediante los procesos de electrocoagulación y foto Fenton con el equipo diseñado?	Determinar las condiciones de operación del proceso de electrocoagulación y catálisis solar en soluciones de colorante textil "Taicron Red" para la remoción del color y la demanda química de oxígeno	Se logra una remoción eficiente del color y la demanda química de oxígeno en soluciones de colorante textil "Taicron Red" mediante los procesos de electrocoagulación y catálisis solar en el equipo diseñado	Dimensiones Concentración inicial del colorante Intensidad de corriente y voltaje Dosis de catalizador nanopartícula de TiO ₂	Hipotética deductiva
¿Como se deberá realizar la remoción de colorantes en agua residual textil industrial utilizando el equipo de electrocoagulación y catálisis solar construido?	Analizar la remoción de colorantes en agua residual textil industrial utilizando el equipo de electrocoagulación y catálisis solar diseñado.	Es posible remover el color y la carga orgánica de un agua residual textil proveniente de la industria mediante los procesos de electrocoagulación y foto Fenton en un reactor solar con las condiciones de operación establecidas para el colorante textil taicron-red.	Tiempo de exposición a la radiación solar.	Nivel de investigación Correlacional Causa-efecto
				Diseño: De laboratorio, Experimental Transversal