

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA QUIMICA



**“REDUCCIÓN DE COLORANTE TEXTIL DIRECTO
A PARTIR DE UNA SOLUCIÓN MODELO
MEDIANTE EL USO DE UN PROCESO DE
OXIDACIÓN AVANZADA”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUÍMICO

CANO TACURI SANDRA LISBET
VÁSQUEZ ROSAS NORAH ALEJANDRA

Callao, 2021

PERÚ


Juan M. Pérez

Sandra Lisbet Cano Tacuri

Norah Alejandra Vásquez Rosas

PRÓLOGO DEL JURADO

La presente tesis fue Sustentada por las señoritas Bachilleres **CANO TACURI, SANDRA LISBET** y **VÁSQUEZ ROSAS, NORAH ALEJANDRA** ante el **JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS** conformado por los siguientes Profesores Ordinarios:

Ing. GUMERCINDO HUAMANÍ TAIPE	Presidente
Ing. CARMEN MABEL LUNA CHAVEZ	Secretaria
Ing. LEONARDO RUFINO CARLOS PEREYRA	Vocal
Ing. JUAN TAUMATURGO MEDINA COLLANA	Asesor

Tal como está asentado en el Libro de Actas N° 2 de Tesis sin Ciclo de Tesis Folio N° 140 y Acta N° 321 de fecha **3 de marzo del 2021**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la Modalidad de Titulación de Tesis sin Ciclo de Tesis, de conformidad establecido por el Reglamento de Grados y Títulos aprobado con la Resolución N° 245 – 2018 – CU de fecha 30 de octubre de 2018.

DEDICATORIA

La presente tesis es dedicada a mi familia,
y a todos los profesores que nos guiaron.

Sin el apoyo de todos ustedes esto hoy no se hubiera concretado.

Sandra Cano Tacuri

DEDICATORIA

A Dios, por la vida y la salud

A mi padre, que me cuida desde el cielo

A mis tíos, que partieron a causa del COVID-19

A mi familia, a quienes descuidé por enfocarme en este trabajo.

Norah Vásquez Rosas

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al ingeniero Juan Medina Collana, nuestro asesor de tesis, por confiar en nosotras, apoyarnos y guiarnos con sus conocimientos y consejos durante todo este tedioso pero satisfactorio proceso.

Al jurado revisor por sus cuidadosas observaciones y sugerencias en pos de la mejora continua de este trabajo.

Al químico farmacéutico Walter Tapia y al Ing. Agérico Pantoja por sus alcances técnicos.

Al Instituto de Educación Ambiental (IEA) por facilitarnos instalaciones y equipos de medición para los análisis pertinentes.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1. Descripción de la realidad problemática	2
1.2. Formulación del problema	3
1.3. Objetivos	3
1.4. Limitantes de la investigación	4
II. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Antecedentes de la investigación	5
2.2. Bases teórico-científicas	9
2.2.1. Reacciones de Óxido-Reducción (REDOX).....	9
2.2.2. Catálisis	9
2.2.3. Radiación Ultravioleta (UV)	9
2.2.4. Acción de agentes oxidantes	10
2.2.5. Aguas residuales textiles	11
2.2.6. Colorantes textiles	12
2.2.7. Tratamiento de aguas residuales.....	14
2.2.8. Procesos de oxidación avanzada (POA)	15
2.2.9. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada.....	15
2.2.10. Proceso homogéneo con peróxido de hidrógeno y UV (H ₂ O ₂ /UV) ...	17
2.2.11. Descripción del Módulo de Oxidación Avanzada	18
2.2.12. Espectrofotometría	19
2.2.13. Curva de calibración	20
2.3. Conceptual	22

2.3.1. Concentración de colorante textil en cuerpos de agua.....	22
2.3.2. H ₂ O ₂ a diferentes concentraciones	22
2.3.3. pH inicial	23
2.4. Definición de términos básicos	23
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES	25
3.1. Hipótesis.....	25
3.1.1. Hipótesis general	25
3.1.2. Hipótesis específicas	25
3.2. Definición conceptual de variables.....	25
Variables independientes (X)	25
Variables dependientes o respuesta (Y).....	25
3.2.1. Operacionalización de variables	26
IV.DISEÑO METODOLÓGICO	28
4.1. Tipo y diseño de investigación	28
4.1.1. Diseño de experimentos – Método de Taguchi.....	29
4.2. Método de investigación	32
4.2.1. Módulo experimental de Oxidación Avanzada.....	33
4.3. Población y muestra	42
4.4. Lugar de estudio	43
4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de información.	43
4.5.1. Técnicas analíticas	43
4.5.2. Instrumentos y/o equipos utilizados	44
4.6. Análisis y procesamiento de datos	44
V.RESULTADOS.....	46
5.1. Resultados descriptivos.....	46
5.1.1 Resultados experimentales obtenidos respecto a los parámetros de operación.....	46

5.1.2. Efectos de los parámetros de operación sobre el porcentaje de reducción de color	54
5.2. Resultados Inferenciales	57
5.2.1. Análisis de los Residuales	57
Normalidad	58
Varianza constante	58
Independencia.....	59
5.2.2. Metodología de Taguchi – Análisis de varianza ANOVA	60
5.2.3. Análisis de Medias y estadístico Señal-ruido de Taguchi.....	61
5.2.4. Análisis del modelo lineal general de Taguchi	65
5.3. Otro tipo de resultados estadísticos, de acuerdo con la naturaleza del problema y la hipótesis	66
5.3.1. Verificación de los parámetros óptimos del proceso a través de la confirmación experimental.....	66
5.3.2. Prueba t de una muestra	67
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	68
6.1. Contrastación y demostración de las hipótesis con los resultados	68
6.1.1. Concentración de colorante textil – Reducción de colorante textil directo (%)	68
6.1.2. Concentración de peróxido de hidrógeno – Reducción de colorante textil directo (%)	68
6.1.3. pH inicial – Reducción del colorante textil directo (%).....	69
6.1.4. Relación de variables independientes sobre la variable dependiente	69
6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares.	69
6.3. Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigentes.....	71
CONCLUSIONES	72
RECOMENDACIONES	73

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
ANEXOS.....	78

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de procesos de oxidación avanzada homogéneos	16
Figura 2. Esquema del módulo experimental de oxidación avanzada	18
Figura 3. Expresión gráfica de la ley de Beer-Lambert.....	20
Figura 4. Curva de calibración del colorante naranja direct 39	21
Figura 5. Diagrama general del proceso de oxidación avanzada (POA)	28
Figura 6. Pasos de ejecución del método de Taguchi	30
Figura 7. Etapas del método de investigación.....	33
Figura 8. Módulo de oxidación avanzada.....	34
Figura 9. Instalación del tanque de almacenamiento de muestra.....	35
Figura 10. Pruebas de prefactibilidad con distintos colorantes	36
Figura 11. Análisis volumétrico de permanganometría.....	36
Figura 12. Uso del peachímetro portátil para ajuste de pH inicial.....	37
Figura 13. Preparación de la solución modelo	37
Figura 14. Adición de solución oxidante.....	38
Figura 15. Medición del pH inicial en el tanque de almacenamiento	38
Figura 16. Rotámetro en módulo de oxidación avanzada	39
Figura 17. Módulo de oxidación avanzada con solución modelo.....	39
Figura 18. Toma de muestra, medición de pH y conservación en frío	40
Figura 19. Muestras tomadas cada 30 minutos.....	40
Figura 20. Espectrofotómetro VIS DR 1900 HACH	41
Figura 21. Lectura de absorbancias de muestras en el espectrofotómetro	41
Figura 22. Estructura química de colorante naranja direct 39	42
Figura 23. Análisis volumétrico con permanganato de potasio.....	43
Figura 24. Análisis de absorbancia, blanco y muestra de interés	44
Figura 25. Variación del % de reducción de color a [Colorante] = 10 ppm, [H ₂ O ₂] = 10% W/W, pH = 3	47
Figura 26. Variación del % de reducción de color a [Colorante] = 10 ppm, [H ₂ O ₂] = 30%W/W, pH = 6	47
Figura 27. Variación del % de reducción de color a [Colorante] = 10 ppm, [H ₂ O ₂] = 50%W/W, pH = 10	48

Figura 28. Variación del % de reducción de color a [Colorante] = 15 ppm, [H ₂ O ₂] = 10%W/W, pH = 6	48
Figura 29. Variación del % de reducción de color a [Colorante] = 15 ppm, [H ₂ O ₂] = 30%W/W, pH = 10	49
Figura 30. Variación del % de reducción de color a [Colorante] = 15 ppm, [H ₂ O ₂] = 50%W/W, pH = 3	49
Figura 31. Variación del % de reducción de color a [Colorante] = 20 ppm, [H ₂ O ₂] = 10%W/W, pH = 10	50
Figura 32. Variación del % de reducción de color a [Colorante] = 20 ppm, [H ₂ O ₂] = 30%W/W, pH = 3.	50
Figura 33. Variación del % de reducción de color a [Colorante] = 20 ppm, [H ₂ O ₂] = 50%W/W, pH = 6	51
Figura 34. Absorbancia como función del tiempo.....	52
Figura 35. pH como función del tiempo.....	53
Figura 36. Temperatura como función del tiempo	54
Figura 37. Efecto de [Colorante] a diferentes [H ₂ O ₂]	54
Figura 38. Efecto de [Colorante] a diferentes pH iniciales	55
Figura 39. Efecto de [H ₂ O ₂] a diferentes [Colorante]	55
Figura 40. Efecto de [H ₂ O ₂] a diferentes pH iniciales	56
Figura 41. Efecto del pH inicial a diferentes [H ₂ O ₂]	56
Figura 42. Efecto del pH inicial a diferentes [Colorante]	57
Figura 43. Supuesto de normalidad en análisis de residuales.....	58
Figura 44. Supuesto de varianza constante en análisis de residuales	59
Figura 45. Supuesto de independencia en análisis de residuales	59
Figura 46. Contribución porcentual de factores de estudio en reducción de color	61
Figura 47. Efectos principales para medias de cada factor	61
Figura 48. Efectos de cada factor en la señal ruido (SN)	62
Figura 49. Prueba de confirmación de experimentos en condiciones óptimas. 66	
Figura 50. Porcentaje de reducción de color vs tiempo para prueba adicional .87	
Figura 51. Sistema floculador de tubos	90
Figura 52. Tanque de floculación por aire disuelto (DAF)	91

Figura 53. Dosificación de peróxido de hidrógeno y generador de ozono	91
Figura 54. Sistema de ultrafiltración y ósmosis inversa	92
Figura 55. Muestreo de efluente residual pretratado en planta piloto textilera..	93
Figura 56. Efluente residual inicial pretratado	93
Figura 57. Efluente residual pretratado antes y después de la oxidación avanzada.	94

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de colorantes textiles según sus aplicaciones tecnológicas.....	13
Tabla 2. Clasificación de colorantes textiles según grupos funcionales presentes.....	13
Tabla 3. Equivalencias de concentración en porcentaje peso-peso y volúmenes.....	22
Tabla 4. Matriz de operacionalización de variables.....	26
Tabla 5. Factores y niveles de operación.....	31
Tabla 6. Matriz ortogonal Taguchi L ₉	32
Tabla 7. Porcentaje de reducción de color respecto a los parámetros de operación.....	46
Tabla 8. Absorbancias vs parámetros de operación.....	51
Tabla 9. pH vs parámetros de operación.....	52
Tabla 11. Parámetros del análisis estadístico ANOVA.....	60
Tabla 12. Respuesta para medias.....	62
Tabla 13. Coeficientes de modelos estimados para relaciones señal /ruido.....	63
Tabla 14. Resumen del modelo.....	63
Tabla 15. Análisis de varianza de relaciones señal/ruido.....	64
Tabla 16. Respuesta para relaciones de señal/ruido.....	64
Tabla 17. Coeficientes del modelo lineal de Taguchi.....	65
Tabla 18. Resumen del modelo lineal general de Taguchi.....	65
Tabla 19. Resultados de confirmación experimental en condiciones óptimas ..	66
Tabla 20. Estadísticas descriptivas de la prueba t de una muestra.....	67
Tabla 21. Prueba t.....	67
Tabla 22. Parámetros inicio-fin para solución modelo con exceso de colorante.....	87
Tabla 23. Caracterización de efluente textil pretratado.....	94
Tabla 24. Absorbancia y TSS en tratamiento de efluente residual pretratado ..	95
Tabla 25. Data experimental de la figura 25.....	96

Tabla 26. Data experimental de la figura 26.....	96
Tabla 27. Data experimental de la figura 27.....	96
Tabla 28. Data experimental de la figura 28.....	97
Tabla 29. Data experimental de la figura 29.....	97
Tabla 30. Data experimental de la figura 30.....	97
Tabla 31. Data experimental de la figura 31.....	98
Tabla 32. Data experimental de la figura 32.....	98
Tabla 33. Data experimental de la figura 33.....	98
Tabla 34. Data experimental de la figura 34.....	99
Tabla 35. Data experimental de la figura 35.....	99
Tabla 36. Data experimental de la figura 36.....	99
Tabla 37. Data experimental de la figura 37.....	100
Tabla 38. Data experimental de la figura 38.....	100
Tabla 39. Data experimental de la figura 39.....	100
Tabla 40. Data experimental de la figura 40.....	100
Tabla 41. Data experimental de la figura 41.....	101
Tabla 42. Data experimental de la figura 42.....	101
Tabla 43. Data experimental de la figura 47, prueba adicional a 50 ppm.	101

RESUMEN

Los efluentes textiles contienen una gran variedad de contaminantes tales como sales, surfactantes, grasas, solventes, colorantes, etc. Los colorantes están considerados como contaminantes persistentes que no pueden removerse con los métodos convencionales de tratamiento de aguas, debido a su origen y las estructuras complejas que poseen. En este trabajo se estudió la reducción de colorante textil directo NARANJA DIRECT 39 como contaminante a partir de una solución modelo mediante el uso del proceso de oxidación avanzada H_2O_2/UV en un módulo experimental. Para ello, se analizaron parámetros como la concentración de colorante textil (ppm) de la solución modelo, concentración de peróxido de hidrógeno (%W/W) y el pH inicial utilizando el diseño de experimentos de Taguchi. Del estudio se concluyó que el proceso de oxidación avanzada H_2O_2/UV genera resultados eficaces en la reducción del colorante textil directo, en las siguientes condiciones: concentración del colorante textil de 15 ppm, concentración de peróxido de hidrógeno de 30 % W/W y pH inicial = 3. Mediante un Análisis de Varianza (ANOVA) se determinó el porcentaje de contribución de los parámetros en la reducción del colorante, siendo el pH el que más contribuía (52%), seguido de la concentración de peróxido de hidrógeno (38%) y finalmente la concentración de colorante textil (8%). Se obtuvieron porcentajes de reducción hasta de 100 % en la decoloración de la solución modelo, durante 3 horas de tratamiento.

Palabras claves: Procesos de oxidación avanzada, colorantes textiles, solución modelo, proceso H_2O_2/UV .

ABSTRACT

Textile effluents contain a wide variety of contaminants such as salts, surfactants, fats, solvents, dyes, etc. The dyes are considered as persistent pollutants that cannot be removed with conventional water treatment methods, due to their origin and the complex structures they possess. In this research, the reduction of direct textile dye NARANJA DIRECT 39 like pollutant from a model solution was studied through the use of an advanced oxidation process H_2O_2 / UV. For this, it was analyzed the parameters as textile dye concentration (ppm), hydrogen peroxide concentration (% W/W) and initial pH using a design of Taguchi experiments. Of the study was concluded that the advanced oxidation process generates favorable results in the reduction of direct textile dye, in the following conditions: textile dye concentration of 15 ppm, hydrogen peroxide concentration of 30 %W/W and pH = 3. Through an Analysis of Variance (ANOVA) the percentage of contribution of the parameters in the dye reduction was determined, being the pH that contributed the most (52%), followed by the concentration of hydrogen peroxide (38%) and finally the concentration of textile dye (8%). Reduction percentages up to 100% were obtained in the discoloration of the model solution, during 3 hours of treatment.

Keywords: Advance oxidation processes, textile dyes, model solution, H_2O_2 /UV process.

INTRODUCCIÓN

La industria textil tiene un rol importante para el crecimiento de la economía mundial, pero es una de las industrias con mayor demanda de agua y las aguas residuales que se generan contienen un sinnúmero de contaminantes de diferente composición. Entre los contaminantes de mayor importancia a remover se encuentran los colorantes. Estos compuestos son muy resistentes por lo que su tratamiento se convierte en un proceso complejo.

Según Urkiaga, Gomez, Gutierrez, & De las Fuentes (2018) mencionan: “El tratamiento mediante Procesos de Oxidación Avanzada (POA) de aguas contaminadas con productos orgánicos tóxico y/o difícilmente biodegradable se perfila como un método adecuado y con grandes posibilidades de desarrollo a corto plazo”.

En este sentido, el tratamiento mediante Procesos de Oxidación Avanzada (POA) de las aguas residuales que se generan por las industrias textiles es una alternativa que se contrasta con la teoría, este tipo de procesos implican la formación de radicales hidroxilos (OH^\cdot) que tienen un elevado potencial de oxidación. Para tal fin en este trabajo se estudió la reducción de colorante textil directo a partir de una solución modelo mediante el uso de un proceso de oxidación avanzada, el POA escogido fue el de combinación $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$; el poder oxidante del peróxido de hidrógeno potenciado con radiación ultravioleta

Dicho tratamiento fue llevado a cabo en un módulo de Oxidación Avanzada que se encuentra en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU) de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

La contaminación del agua debida a efluentes residuales provenientes de la industria textil representa un riesgo tanto para el ser humano como para los ecosistemas acuáticos, ya que dichos efluentes son vertidos al desagüe o a los ríos sin el adecuado tratamiento.

Aproximadamente 1,84 billones de toneladas de efluentes residuales textiles fueron generados en China durante el 2015, haciendo a la industria textil la tercera más grande en contribuir con aguas residuales en China (Government of China, 2015).

Bangladesh, este país asiático es el segundo fabricante mundial de textiles, pero su éxito está agotando el agua; las aguas residuales de la industria textil en dicho país se estimaron en alrededor de 217 millones de m³ en 2016 y llegarán a 349 millones de m³ para 2021 si las industrias textiles continúan utilizando prácticas de teñido convencionales. (Hossain, Kanti Sarker, & Samad Khan, 2018)

En Sudamérica, un escenario de contaminación es el río Patate (Ecuador), ya que desechos industriales de teñidos y confecciones de jeans ponen en riesgo a este afluente de agua. Allí, los valores de DBO bordean los 450 miligramos por litros (mg/l), cuando el límite está en 250. El caso es similar en la demanda química de oxígeno (DQO), que también analiza los contaminantes del agua, ésta última se sitúa en 880 mg/l, cuando lo normal es 500. (Diario El Telégrafo - Ecuador, 2009).

En el Perú, la magnitud real del volumen de las aguas residuales que las industrias formales e informales producen no es conocida con exactitud. (Gutierrez, Brañez, Pérez, Uribe, & Valle, 2018).

Ante este panorama, surge la necesidad de realizar estudios para tratar la contaminación que generan las aguas residuales textiles, utilizando procesos de oxidación avanzada.

El presente trabajo buscó reducir la coloración de soluciones modelo que contienen el colorante textil Naranja Direct 39 disuelto a modo de contaminante, utilizando el proceso de oxidación avanzada H_2O_2/UV .

1.2. Formulación del problema

Problema General

¿Cuál es el efecto del uso de un proceso de oxidación avanzada en la reducción de colorante textil directo en una solución modelo?

Problemas específicos

- ¿Cuál es la concentración de colorante textil que logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada?
- ¿Cuál es la concentración de peróxido de hidrógeno que logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada?
- ¿Cuál es el pH inicial que logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada?

1.3. Objetivos

Objetivo General

Determinar la eficacia del proceso de oxidación avanzada para reducir el colorante textil directo en una solución modelo.

Objetivos específicos

- Determinar la concentración de colorante textil que logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada.
- Determinar la concentración de peróxido de hidrógeno que logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada.
- Determinar el pH inicial que logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada.

1.4. Limitantes de la investigación

Teórica: Esta área de investigación no presenta suficiente información (papers, artículos, tesis, etc.) respecto a procesos de oxidación avanzada en sistemas de tratamientos modulares.

Espacial: La presente tesis está limitada al tratamiento de colorantes textiles directos, utilizados en la industria textil, en soluciones acuosas.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

A nivel internacional tenemos los siguientes estudios:

Hassan, El Nemr, & Madkour (2017), en su investigación titulada **“Advanced oxidation processes of Mordant Violet 40 dye in freshwater and seawater”** llevada a cabo en Egipto, vieron la factibilidad de la aplicación de O₃ (ozono) y ozono combinado con luz ultravioleta (UV) para degradar el colorante textil Mordant Violet 40 en agua residual sintética. Los parámetros experimentales que estudiaron fueron el pH, concentración inicial del colorante y el tiempo de reacción; se utilizó un reactor batch de 200ml. Los resultados que obtuvieron mostraron que el pH y la concentración inicial del colorante controlaron el proceso de decoloración. El mayor porcentaje de decoloración que alcanzaron fue de 98%, esto fue obtenido a un pH 9 (medio alcalino) durante los primeros 20 minutos de operación y la eficiencia del color removido fue mayor en el caso del tratamiento combinado Ozono / UV comparado con Ozono solamente; esto es atribuido debido a que en el proceso combinado aumentó la producción de radicales hidroxilos, los cuales ayudaron a la mineralización del colorante.

Según Castro Peña & Durán Herrera (2013), en su investigación titulada **“Degradación y decoloración de agua contaminada con colorantes textiles mediante procesos de oxidación avanzada”** llevada a cabo en Costa Rica, estudiaron la efectividad de los procesos de oxidación avanzada H₂O₂/UV y H₂O₂/Fe²⁺/UV en la degradación y decoloración de agua contaminada con colorante textil. Para ello, analizaron el efecto de la concentración inicial del colorante, el pH de la solución, la concentración de hierro y la concentración de peróxido de hidrógeno mediante un diseño estadístico de experimentos de Taguchi. Encontraron que tanto el proceso H₂O₂/UV como el H₂O₂/ Fe²⁺/UV son tratamientos viables para tratar aguas contaminadas con colorante textil, con los que alcanzaron porcentajes altos en la disminución del color y reducción de su contenido orgánico; siendo el proceso Foto-Fenton (H₂O₂/ Fe²⁺/UV) el que les generó resultados más

favorables en la degradación y decoloración del tinte, en las siguientes condiciones de operación: pH= 2, concentraciones de colorante de 100 ppm, de hierro de 80 ppm y de peróxido de hidrógeno de 102 ppm (3,0 mmol/L). Bajo estas condiciones, obtuvieron porcentajes de reducción promedio de 65,5% en la DQO y de 77,0% en la decoloración del tinte luego de una hora de tratamiento.

Amin, Amer, El Fecky, & Ibrahim (2008), en su investigación titulada “**Treatment of textile waste water using H₂O₂/UV system**”, en Egipto, estudiaron el tratamiento de una muestra de agua residual textil mediante la oxidación avanzada haciendo uso del sistema H₂O₂/UV. Para este fin, hallaron la condición óptima para el tratamiento de este efluente mediante la experimentación de una solución sintética utilizando un colorante textil sulfurado y diferentes parámetros que afectan la velocidad de reacción de degradación fueron testeados (intensidad UV de 18, 36 y 54 W; concentración inicial del colorante de 70, 80, 90 y 100 ppm; pH 3; pH de la solución en el rango de 8 a 10 y dosificación del catalizador). La Absorbancia fue medida para determinar la eficiencia de la decoloración. El COT (Carbono Orgánico Total) fue medido para evaluar el grado de mineralización. Para tratar la muestra de agua residual, determinaron el COT (700 mg/l) antes del tratamiento H₂O₂ / UV, luego la muestra fue puesta bajo las condiciones óptimas del sistema: dosis de H₂O₂ 10 ml (3,9 wt%), pH 7,29, concentración inicial del colorante 70 ppm, intensidad UV 54 W. Después de 5 horas, el COT determinado fue de 105 mg/l (eficiencia de la remoción 85%).

Aleboyeh, Aleboyeh, & Moussa (2003), en su investigación titulada “**The study of the effect of different variable on H₂O₂/UV decolorization of three azo dyes in the continous circulation photoreactor**”, llevada a cabo en Francia, tuvieron como objetivo estudiar la decoloración de 3 colorantes azoicos: *Acid Orange 7*, *Acid Orange 8* y *Methyl Orange* en soluciones acuosas mediante el proceso de oxidación avanzada H₂O₂/UV en un fotorreactor de circulación continua y determinar la cinética de la reacción de decoloración.

Estudiaron los efectos de la dosis de peróxido de hidrógeno, concentración inicial de colorante y el pH. Concluyeron que el proceso presenta un buen desempeño en la decoloración de los colorantes mencionados.

La tasa de decoloración se incrementó al aumentar la concentración inicial de peróxido de hidrógeno hasta 0,02 mol/L; donde alcanzó un máximo y por encima de dicha concentración la reacción se inhibió. También evidenciaron que, en soluciones neutras o ácidas, la tasa de decoloración mejoraba y con respecto al aumento de la concentración inicial de colorante; ésta actuaba como un filtro que absorbía cada vez más la radiación UV y disminuía la cinética de remoción, que observaron fue de pseudo-primer orden.

A nivel nacional tenemos los siguientes estudios:

Pinedo & Anaya (2017), en su investigación titulada “**Estudio de la decoloración del colorante sunfix yellow S₄GL empleando el proceso de oxidación avanzada H₂O₂ / UV**” tuvieron como objetivo determinar los parámetros óptimos en la decoloración del colorante reactivo, para ello evaluaron el efecto de la concentración inicial de peróxido, el pH inicial de la solución, la concentración inicial de colorante y la intensidad de radiación UV. También realizaron el estudio cinético de la decoloración del colorante. Las muestras fueron soluciones acuosas del colorante que prepararon en el laboratorio a diferentes concentraciones y la técnica fisicoquímica que utilizaron fue la espectrofotometría. Los valores óptimos del proceso fueron: concentración inicial de H₂O₂ a $3,8 \times 10^{-2}$ mol/L, pH 3, concentración inicial del colorante a 20 mg/L, potencia de radiación 3 lámparas con potencia de 15 W cada una. Determinaron que la cinética de decoloración del colorante reactivo, en las condiciones óptimas de decoloración, fue de pseudo-primer orden, siendo más importantes el efecto del pH y la concentración inicial del colorante reactivo. Alcanzaron un porcentaje de decoloración del 100% en una hora de tratamiento.

Salas(2017), en su tesis titulada “**Degradación de colorantes en efluentes provenientes de industrias textiles usando proceso de oxidación avanzada**”, tuvo como objetivo evaluar la eficiencia del proceso de oxidación avanzada Foto-Fenton en muestras de efluentes textiles de empresas situadas la ciudad de Arequipa. Para ello, analizó seis parámetros como pH, DQO total, DBO, SST (Sólidos Solubles Totales), aceites y grasas e índices de color; antes y después de aplicado el tratamiento, el cual constaba de cuatro etapas: filtración, acidificación, reacciones redox y neutralización. Logró degradar en un 94% el índice de color, reducción en un 80% en el DQO total, 62% en el DBO y 31% en los sólidos solubles totales, demostrando que el proceso Foto-Fenton es una alternativa eficaz y presenta un potencial elevado para la degradación de los colorantes que se encuentran en los efluentes textiles.

Tinoco, Medina & Zapata(2011), en su investigación titulada “**Tratamiento de efluentes textiles con luz ultravioleta**”, tuvieron como objetivo el de probar que la luz ultravioleta puede ser utilizada para el tratamiento de efluentes textiles. Para ello, simularon; por razones de infraestructura, muestras de agua sintética mediante soluciones acuosas con colorante textil rojo de synosol a 100 ppm. Llevaron a cabo dos experimentos, el primero a diferentes concentraciones de peróxido de hidrógeno con exposición a la luz UV; una vez hallaron la concentración óptima de peróxido, la utilizaron para el segundo experimento, en el cual a diferentes concentraciones de dióxido de titanio y diferentes tiempos de exposición a luz UV lograron la decoloración de las muestras. El tiempo óptimo de degradación del color que obtuvieron fue de 2 horas, la concentración óptima de peróxido de hidrógeno fue de 0,005% y la concentración de dióxido de titanio para lograr la decoloración fue de 50 ppm logrando un porcentaje de decoloración del 90%.

2.2. Bases teórico-científicas

2.2.1. Reacciones de Óxido-Reducción (REDOX)

Las reacciones de óxido-reducción son aquellas en la que existe una transferencia de electrones o un cambio en los estados de oxidación de las sustancias que forman parte de una reacción química. La sustancia que se oxida, es decir la que pierde electrones se denomina agente reductor; mientras que la sustancia que se reduce, es decir la que gana electrones se denomina agente oxidante.

2.2.2. Catálisis

La catálisis es el proceso por el cual se aumenta la velocidad de una reacción química, debido a la participación de una sustancia llamada catalizador y aquellas que desactivan la catálisis son denominados inhibidores.

Una característica importante es que la masa de catalizador no se modifica durante la reacción química, lo que lo diferencia de un reactivo, cuya masa va disminuyendo a lo largo de la reacción. Los catalizadores pueden ser homogéneos o heterogéneos; los homogéneos son aquellos que actúan en una misma fase con los reactivos; mientras que los heterogéneos actúan en una fase diferente. La mayoría de los catalizadores heterogéneos son sólidos.

2.2.3. Radiación Ultravioleta (UV)

El espectro ultravioleta se puede dividir en cuatro bandas: UV-A (315 a 400 nm); UV-B (280 a 315 nm), UV-C (200 a 280 nm) y UV-vacío (40 a 200 nm). Las más utilizadas con fines ambientales son UV-A y UV-C.

La luz ultravioleta actúa mediante la interacción con las moléculas presentes en el medio líquido provocando en la mayoría de los casos, una ruptura de los enlaces químicos. Para que la fotólisis ocurra (disociación) es necesario la absorción de un fotón por la molécula y además que la energía del fotón exceda la energía del enlace que se quiere destruir.

Debido a la propiedad intrínseca de promover disociación entre las moléculas, la aplicación de la radiación UV individualmente se prueba en algunos trabajos. Sin embargo, hay poca mineralización de los compuestos químicos estudiados, incluso cuando se tienen tiempos de aplicación de radiación relativamente largos. De esta forma, se están estudiando combinaciones entre agentes oxidantes químicos y radiación UV, debido a que algunos procesos oxidativos se consideran lentos en la generación de radicales hidroxilos. Con estas combinaciones, generalmente, se obtienen en mejores eficiencias de reducción cuando se comparan con tratamientos individuales, esto se verifica en diferentes trabajos citados en la literatura. (Rodríguez, Botelho, & Cleto, 2008)

2.2.4. Acción de agentes oxidantes

- Peróxido de hidrógeno (H_2O_2)

El peróxido de hidrógeno es un oxidante versátil, superior al cloro, dióxido de cloro y permanganato de potasio. Tiene la capacidad de producir radicales hidroxilos vía catálisis, bien sea en presencia o ausencia de radiación.

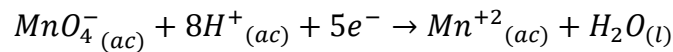
La característica selectiva del peróxido de hidrógeno favorece su uso en diferentes aplicaciones. Simplemente ajustando factores como el pH, temperatura, dosis, tiempo de reacción, adición de catalizadores, el H_2O_2 puede oxidar compuestos orgánicos complejos en compuestos menores, menos tóxicos y más biodegradables, razones para convertir esta aplicación en una solución atractiva para tratamiento de efluentes industriales. Es importante resaltar que el exceso en la aplicación del peróxido de hidrógeno y altas concentraciones de radicales hidroxilos origina reacciones competitivas que producen efectos inhibitorios en la degradación de los compuestos. (Rodríguez, Botelho, & Cleto, 2008).

- Permanganato de potasio ($KMnO_4$)

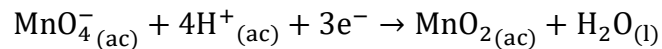
El ión permanganato es uno de los oxidantes de uso más generalizado, debido no solamente a su alto poder de oxidación, sino también a sus características de auto indicador visual. La adición de la primera gota de solución de permanganato en exceso imparte un color rosa a la solución.

La reducción del permanganato puede producir diferentes estados de oxidación del manganeso, dependiendo de las condiciones de la solución.

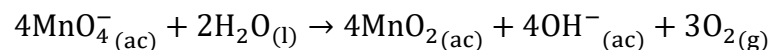
En medios fuertemente ácidos, el permanganato produce una reducción de 5 electrones a ión manganeso II (2 electrones):



En soluciones débilmente ácidas, neutras o débilmente alcalinas, la reducción del permanganato es de 3 electrones, formándose óxido de manganeso hidratado:



El permanganato de potasio puede obtenerse en alto grado de pureza, pero no es conveniente utilizarlo como patrón primario, pues sus soluciones recién preparadas son inestables, pudiéndose producir la siguiente reacción de descomposición:



Esta reacción verifica lentamente el medio neutro, y con mayor rapidez en soluciones ácidas ya que es autocatalítica, pues el MnO_2 que se forma acelera la descomposición. Además, es catalizada por la luz y el ión Mn^{+2} (con 2 electrones).

2.2.5. Aguas residuales textiles

Son efluentes generadas en el proceso productivo textil, cuyas características depende del tipo de operaciones que se produzcan en las plantas de producción.

Según la calidad, los efluentes necesitan un pretratamiento, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado.

- Características de los efluentes textiles

Las aguas residuales generadas en los procesos de tintura y acabados textiles presentan las siguientes características: (López & Crespi, 2015).

- 1) Gran variabilidad de caudal y carga contaminante.
- 2) Bajo contenido de materia coloidal y en suspensión.
- 3) La mayor parte de contaminantes son solubles y moderadamente biodegradables.
- 4) Su carga orgánica media (DQO) es aproximadamente el doble que la de un efluente urbano.
- 5) Su toxicidad es baja comparada con otros sectores industriales.
- 6) A menudo son deficitarias en nutrientes (N, P).
- 7) Exentas de microorganismos patógenos.
- 8) Sus principales características específicas son su elevada coloración y salinidad.

- Principales parámetros para caracterizar las aguas residuales de la industria textil

Los principales parámetros para caracterizar las aguas residuales de la industria textil son: (López & Crespi, 2015).

- 1) Demanda química de oxígeno (DQO)
- 2) Carbono orgánico total (COT).
- 3) Materias en Suspensión (MES).
- 4) Conductividad (Salinidad).
- 5) Color.

2.2.6. Colorantes textiles

Son sustancias de origen natural o sintéticas solubles (colorantes) que imparten color a las fibras. Se clasifican según sus aplicaciones tecnológicas (en función de la forma de aplicación del colorante o de la fibra utilizada) y grupos funcionales (átomo o grupo de átomos característicos responsables del comportamiento químico).

La mayoría de los colorantes utilizados en la industria textil son los azoicos y a la vez son los de una tonalidad más clara (70-80 %), seguidos por los ftalcianinas. (Sedlak, 2013).

Tabla 1
Clasificación de colorantes textiles según sus aplicaciones tecnológicas

Denominación	Características
Ácidos	Teñido de fibras proteicas (lana y seda). Solubles en agua
Básicos	Teñido de fibras acrílicas. Solubles en agua.
Dispersos	Tintes insolubles que se aplican formando una dispersión muy fina en el agua.
Directos	Gran afinidad con fibras de algodón, generalmente son sales de ácido sulfónico. Solubles en el agua.
Reactivos	Reacciona con las fibras formando enlaces covalentes, afín con fibras de algodón. Solubles en agua.

Fuente: Adaptado de Barrios, Gaviria, Agudelo, & Cardona, 2015.

Tabla 2
Clasificación de colorantes textiles según grupos funcionales presentes

Denominación	Grupo funcional
Azoicos	$-N = N -$
Carbonilo	$C = O$
Metilo	$-CH_3$
Nitro	$-NO_2$
Azometino	$-CH = N -$

Fuente: Adaptado de Barrios, Gaviria, Agudelo, & Cardona, 2015

2.2.7. Tratamiento de aguas residuales

Una PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales) suele estar formada por las siguientes etapas: pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento secundario.

Debido a la situación hídrica de nuestro país, en muchas ocasiones las PTAR necesitan implantar tratamientos terciarios en sus instalaciones con el objetivo de poder regenerar y reutilizar las aguas depuradas. (Bes Monge, Silva, & Bengoa).

A continuación, veamos en qué consisten:

- Tratamiento primario

El objetivo es reducir los sólidos en suspensión o el acondicionamiento de las aguas para pasar al tratamiento secundario. Los métodos que conforman el tratamiento primario en las PTARs son el desbaste, desarenado, sedimentación, neutralización, coagulación-floculación, etc.

- Tratamiento secundario

El objetivo es remover la materia orgánica contaminante por la acción de microorganismos. Los métodos conforman sistemas aerobios, anaerobios, lodos activados, etc.

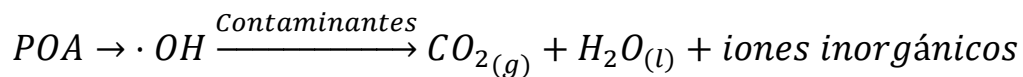
- Tratamiento terciario

Es el procedimiento más completo para tratar el contenido de las aguas residuales. El objetivo es eliminar los contaminantes que perduran después del tratamiento primario y secundario. Entre los métodos más utilizados tenemos: la adsorción, intercambio iónico, ultrafiltración, ósmosis inversa, electrodiálisis, oxidación avanzada, etc.

2.2.8. Procesos de oxidación avanzada (POA)

Los procesos de oxidación avanzada (POA) consisten en una oxidación química en condiciones de presión y temperatura ambiente, con la cual se puede llegar hasta la mineralización completa de los contaminantes. (Kim & Vogelpohl, 2004)

La siguiente expresión representa lo anteriormente dicho:



El agente oxidante es un radical denominado hidroxilo ($\cdot OH$), el cual posee una elevadísima capacidad oxidante (potencial de oxidación 2.8 V); es no selectivo y presenta tiempos de reacción muy cortos. (Almecija, y otros, 2010)

La versatilidad de los POAs se debe al hecho de que existen diferentes formas de producir los radicales hidroxilos y pueden escogerse cual utilizar, dependiendo de los requerimientos específicos de cada agua residual. (Castro Peña & Durán Herrera, 2013).

2.2.9. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada

Este tipo de procesos se pueden clasificar en procesos homogéneos y heterogéneos. Dentro de los procesos homogéneos se pueden llevar a cabo sin aporte de energía o con ella, a continuación, veamos los más estudiados según el tipo de energía aplicada:

- Radiación ultravioleta (UV)

En este grupo de tecnologías, el tratamiento foto-Fenton (utilizando sales de hierro) presenta porcentajes de remoción de color cercanos al 100%.

- Ultrasonido (US)

Esta tecnología es efectiva en el rompimiento de estructuras moleculares cíclicas.

- Electroquímica

Los procesos electroquímicos de oxidación avanzada más sencillos son el electro-oxidación u oxidación anódica (OA), basada en la destrucción de los compuestos orgánicos bajo la acción del ánodo de la celda electrolítica. Cuando se genera H_2O_2 en el cátodo alimentado con O_2 o aire, se utiliza la OA con H_2O_2 electrogenerado. Lo anterior se puede observar en la figura 1. (Osorio, Torres, & Sánchez, 2010)

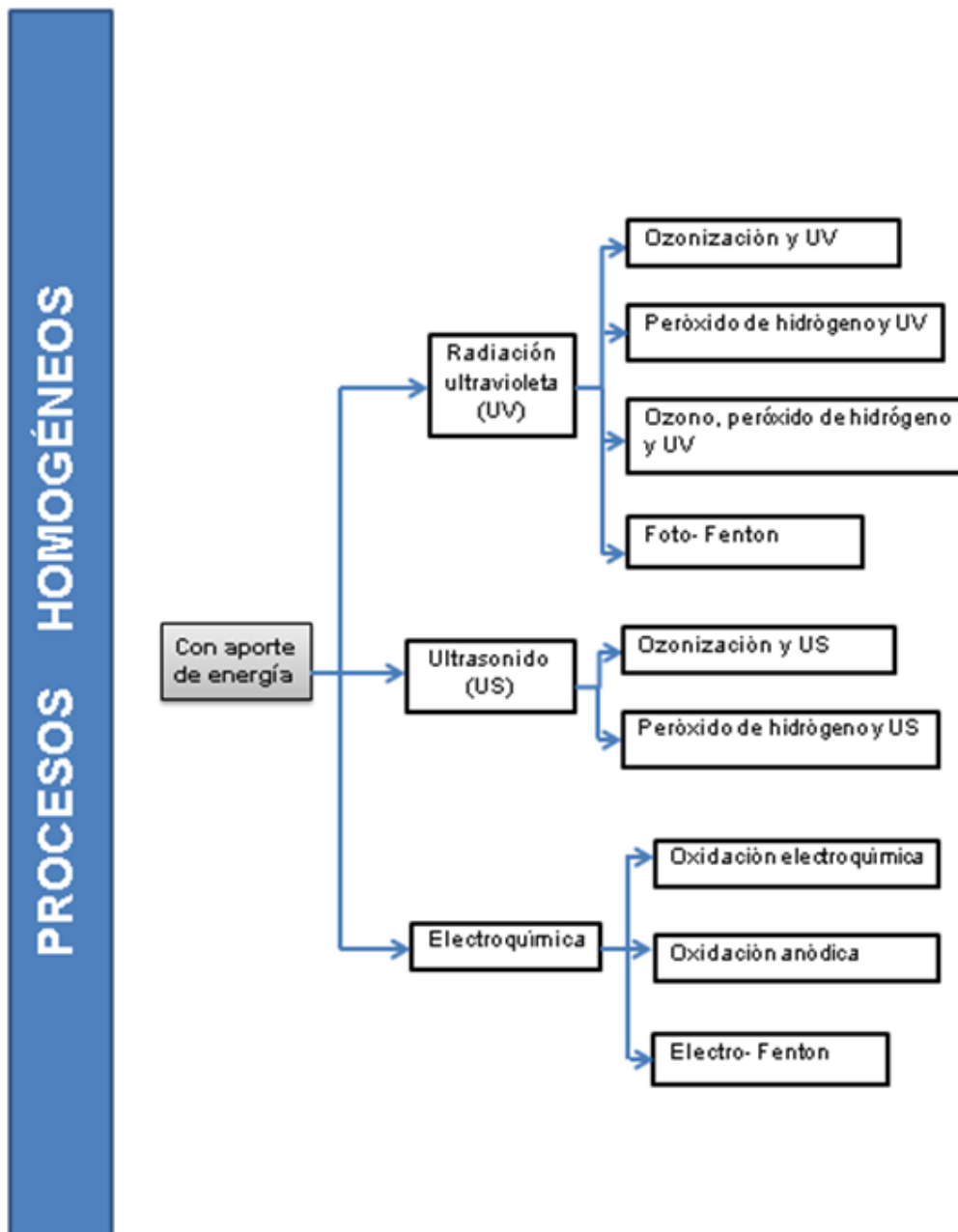
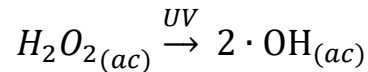


Figura 1. Clasificación de procesos de oxidación avanzada homogéneos

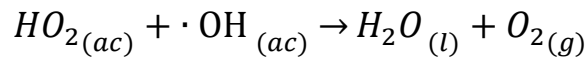
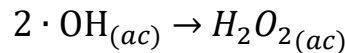
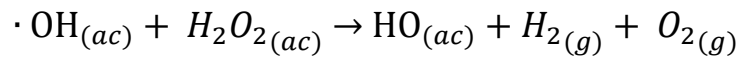
2.2.10. Proceso homogéneo con peróxido de hidrógeno y UV (H₂O₂/UV)

En este POA, la producción de radicales hidroxilos ($\cdot\text{OH}$) se da por la ruptura homolítica del enlace O-O del peróxido de hidrógeno gracias a la radiación ultravioleta.

La reacción de formación de radicales hidroxilos es la que sigue:



Se presentan las secuencias de reacciones entre los radicales hidroxilos y el peróxido de hidrógeno:



En presencia de contaminantes orgánicos, se dan a cabo reacciones con los diferentes radicales formados. (Bes Monge, Silva, & Bengoa)

La aplicación de este POA nos brinda ventajas:

- El peróxido de hidrógeno se encuentra fácilmente en grados técnicos desde 30% W/W, 50% W/W hasta QP (químicamente puro) y de fácil almacenamiento en planta.
- El peróxido de hidrógeno al presentar solubilidad infinita con el agua, es decir, se mezclan sin limitaciones ya que ambos son polares, no existen problemas de transferencia de masa.

Y desventajas como:

- El peróxido de hidrógeno absorbe UV a menos de 300 nm, se recomienda revisar previamente la intensidad y rango de emisión de la fuente de UV.

2.2.11. Descripción del Módulo de Oxidación Avanzada

El Módulo de Oxidación Avanzada genera radicales hidroxilos ($\cdot\text{OH}$) mediante la radiación de peróxido de hidrógeno con luz ultravioleta.

La solución modelo se encuentra en un tanque de acrílico transparente y mediante una bomba es transferida a un fotorreactor.

En el fotorreactor se aloja una lámpara ultravioleta con un tubo protector. A medida que la solución va ingresando, es expuesta a la radiación UV, formando radicales hidroxilos, los cuales oxidan las sustancias solubles no biodegradables contenidas en la solución a tratar (colorante textil directo). La solución irradiada circula hacia el tanque, formando un circuito cerrado. Un rotámetro/caudalímetro permite mediante conocer el caudal de solución modelo en el circuito mediante lectura directa.

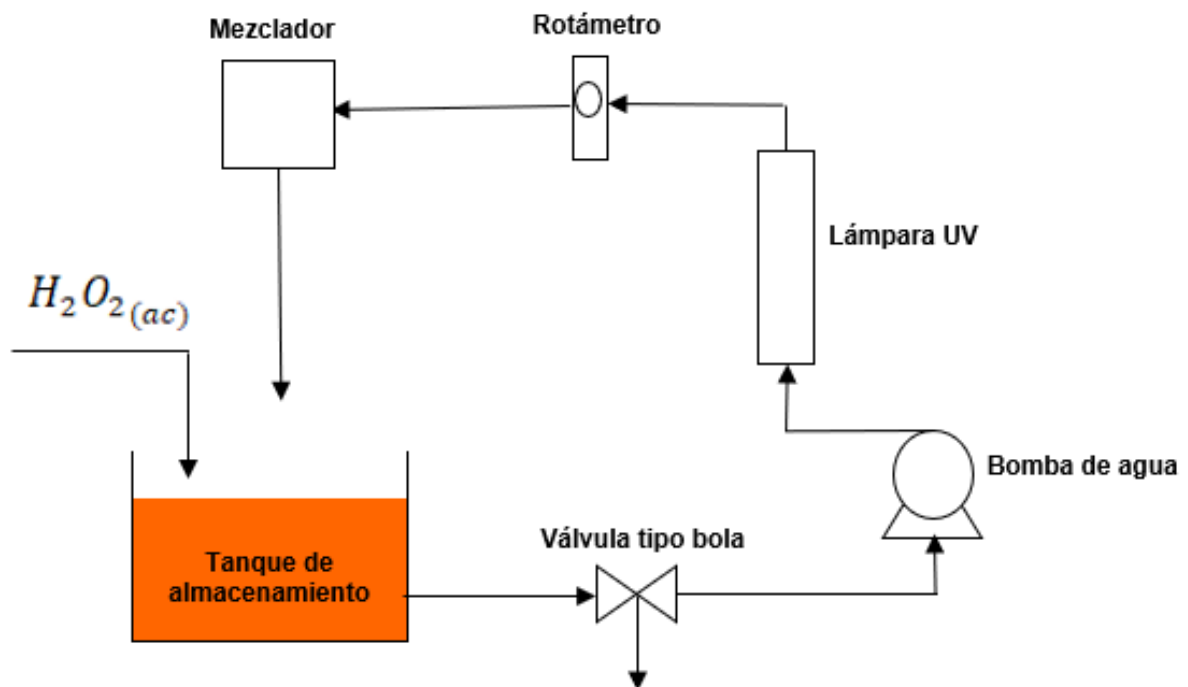


Figura 2. Esquema del módulo experimental de oxidación avanzada

2.2.12. Espectrofotometría

La espectrofotometría es uno de los métodos de análisis más usados, y se basa en la relación que existe entre la absorción de luz por parte de un compuesto y su concentración. Cuando se hace incidir luz monocromática (de una sola longitud de onda) sobre un medio homogéneo, una parte de la luz incidente es absorbida por el medio y otra transmitida, como consecuencia de la intensidad del rayo de luz sea atenuada desde P_0 a P , siendo P_0 la intensidad de la luz incidente y P la intensidad del rayo de luz transmitido. Dependiendo del compuesto y el tipo de absorción a medir, la muestra puede estar en fase líquida, sólida o gaseosa. En las regiones visibles y ultravioleta del espectro electromagnético, la muestra es generalmente disuelta para formar una solución.

La relación cuantitativa que existe entre la cantidad de radiación absorbida y los otros factores experimentales viene dada con exactitud razonable por una ecuación derivada de la ley llamada de Beer-Lambert. (Pickering, 1980) .

La expresión de esta ley es:

$$\log P_0/P = A = abc$$

Donde:

P_0 : Es la intensidad de la energía radiante que se incide sobre la muestra (Watts).

P : Es la intensidad de la energía radiante que emerge de la muestra (Watts).

A : Absorbancia, es la energía radiante absorbida por la muestra, es adimensional.

b : Es el espesor de la cubeta (cm).

a : Es absortividad ($Lg^{-1}cm^{-1}$).

c : Concentración de la especie absorbente, se puede expresar en gramos/litros o en moles/litro.

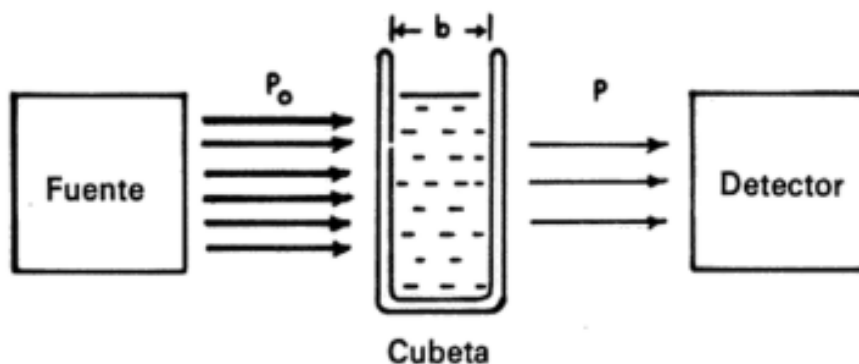


Figura 3. Expresión gráfica de la ley de Beer-Lambert
Fuente: Pickering (1980).

2.2.13. Curva de calibración

La curva de calibración es un método muy usado en la práctica ya que a partir de esta se halla la concentración de la sustancia problema mediante interpolación. Se preparan y se miden una serie de disoluciones patrón de la sustancia que se analiza de concentración variable entre cuyos límites se halla la concentración problema y se representa la absorbancia en función de la concentración. (Pino Pérez, 1983)

De esta forma, una curva de calibración es la representación gráfica que relaciona una señal instrumental en función de la concentración de un analito y define un intervalo de trabajo en el cual, los resultados a informar tienen una precisión y exactitud conocida que ha sido documentada en la validación de cada método. (AGQ Labs Chile S.A, 2017).

En la figura 4 se puede apreciar la curva de calibración, los puntos corresponden a las mediciones experimentales, la línea corresponde al ajuste matemático representado por la ecuación de la recta. Generalmente la respuesta instrumental suele ser la Absorbancia.

Entonces las concentraciones desconocidas de soluciones cuyo analito es la sustancia problema pueden ser determinadas por comparación con disoluciones patrón mediante la técnica de espectrofotometría UV-Visible para mediciones de absorbancia en una determinada longitud de onda máxima ($\lambda_{\text{máx}}$). (Hassan, El Nemr, & Madkour, 2017)

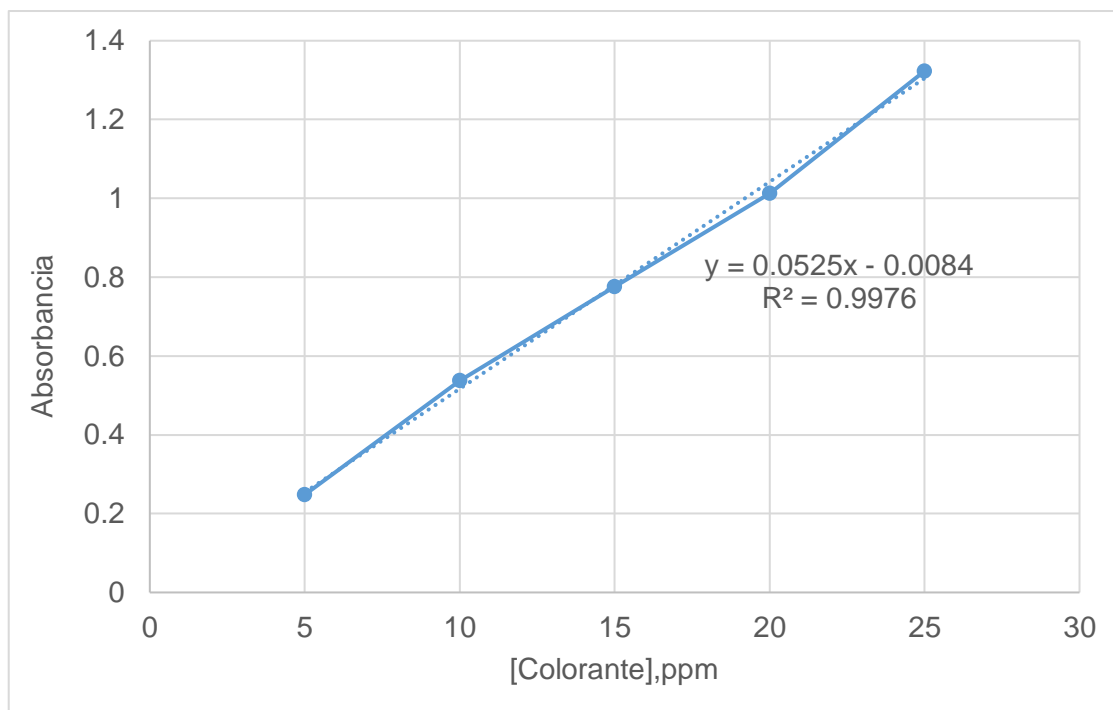


Figura 4. Curva de calibración del colorante naranja direct 39

Si se aplica un tratamiento para reducir dicha sustancia problema en las muestras, los valores de absorbancia nos permitirán conocer el porcentaje (o tasa) de reducción de la sustancia problema mediante la siguiente expresión:

$$\% R = \frac{(A_0 - A_f)}{A_0} \times 100$$

Donde:

%R = Porcentaje de reducción de la sustancia problema en solución.

A₀ = Medida de la absorbancia al inicio (antes de aplicar un tratamiento).

A_f = Medida de la absorbancia en diferentes intervalos de tiempo.

2.3. Conceptual

2.3.1. Concentración de colorante textil en cuerpos de agua

Los efluentes textiles tienen la principal característica de ser altamente coloreados, debido a los procesos de teñido ineficientes, se pierden alrededor del 30% de colorantes en los efluentes descargados (Cortazar, Coronel, Escalante, & González, 2018). Estas descargas directas a cuerpos de agua (ríos, lagos, etc.), sin tratamiento previo, ocasionan fuertes problemas de contaminación, impartiendo una intensa coloración a las aguas, las cuales no solamente generan un aspecto desagradable (contaminación estética) sino que también impiden el paso de la radiación solar necesaria para los ecosistemas acuáticos.

2.3.2. H₂O₂ a diferentes concentraciones

Una forma de expresar la concentración de soluciones de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) es en volúmenes, lo que significa: el número de volúmenes de oxígeno (O₂), medido en condiciones normales, que puede formarse al descomponerse el H₂O₂ contenido en un volumen de la solución. Aunque a nivel industrial, las unidades más utilizadas para medir la concentración de H₂O₂ en soluciones son los porcentajes peso-peso (%W/W); así, una muestra de solución con una concentración de 3 % de H₂O₂ se dice que es de 10 volúmenes, ya que, dicha muestra de solución de esa concentración produce, aproximadamente, un volumen de O₂ diez veces mayor al de la solución.

Tabla 3

Equivalencias de concentración en porcentaje peso-peso y volúmenes

Porcentaje peso-peso (%W/W)	Volúmenes
3	10
8	30
30	110
35	130
50	200

La determinación de peróxido de hidrógeno en soluciones acuosas se determina mediante valoraciones redox con Permanganometría. (Ver Anexos).

2.3.3. pH inicial

El pH es un factor importante en los procesos de oxidación avanzada, ya que según el medio que demos a nuestro sistema de interés, podemos potenciar los efectos deseados o inhibirlos generando reacciones secundarias.

Para el sistema H_2O_2/UV , es sabido que en medio básico la producción de radicales hidroxilos es muy baja debido a que casi todo el peróxido de hidrógeno existente se descompone en dióxido de carbono y agua, siendo solo una pequeña cantidad de peróxido de hidrógeno irradiada por el UV. (Castro Peña & Durán Herrera, 2013)

2.4. Definición de términos básicos

- a) **Biodegradable:** Producto o sustancia que puede descomponerse en elementos químicos naturales por la acción de agentes biológicos, como el sol, el agua, las bacterias, las plantas o los animales.

- b) **Carbono Orgánico Total (COT):** El COT o TOC (siglas en inglés) mide el contenido de carbono orgánico (mgC/L) del agua.

- c) **Color:** Determinación cuantitativa por comparación visual con patrones de Pt-Co (Platino-Cobalto) según el método 2120 del Standard Methods o con espectrofotómetro (valores de absorbancia). La presencia de color en el agua supone un impedimento en el paso de luz al acuífero y supone un desagradable efecto visual.

- d) **Colorante textil directo:** Son colorantes que tiñen algodón y otras fibras de celulosa sin necesidad de aplicar mordentado alguno, cuando son aplicados desde una solución conteniendo sales como NaCl o Na_2SO_4 .

- e) **Conductividad:** Medida del contenido de sales solubles del agua. Indicador del incremento de iones en el agua ($\mu\text{S}/\text{cm}$).
- f) **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** Indica la cantidad de oxígeno ($\text{mg O}_2/\text{L}$) consumido en la oxidación de la materia orgánica del agua, en procesos biológicos aerobios. El ensayo dura entre 5 y 27 días, siendo generalmente el análisis a los 5 días (DBO_5) el más común.
- g) **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Mide la cantidad de oxígeno ($\text{mg O}_2/\text{L}$) necesario para oxidar la materia orgánica soluble o en suspensión, y algunos compuestos minerales oxidables.
- h) **Efluentes:** Aguas servidas con desechos sólidos, líquidos o gaseosos que son emitidos por viviendas y/o industrias, generalmente a los cursos de agua; o que se incorporan a estas por el escurrimiento de terrenos causado por las lluvias.
- i) **Fotocatálisis:** Es una reacción fotoquímica que convierte la energía solar en energía química en la superficie de un catalizador o sustrato, consistente en un material semiconductor que acelera la velocidad de reacción. Durante el proceso tienen lugar reacciones tanto de oxidación como de reducción.
- j) **Materia en Suspensión (MES):** Se refiere a todas las sustancias suspendidas en el agua y que no decantan de forma natural (mg/L).
- k) **Módulo de oxidación avanzada:** Equipo utilizado para impartir cursos de formación académica y/o Industrial, que permite el estudio del proceso de oxidación avanzada con peróxido de hidrógeno y UV.
- l) **Ozono (O_3):** Es un gas incoloro, de olor fuerte, con alto poder oxidante; en fase acuosa se descompone rápidamente a oxígeno y especies radicales.
- m) **Solución modelo de agua residual:** Es una solución que se comporta de forma similar al agua residual industrial, de forma que pueda ser usada en investigaciones a nivel de laboratorio y en reactores prototipo.

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

Utilizando un proceso de oxidación avanzada se reducirá el colorante textil directo en una solución modelo.

3.1.2. Hipótesis específicas

- La concentración de colorante textil de 10 ppm logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada.
- La concentración de peróxido de hidrógeno de 30% W/W logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada.
- El pH inicial de 3 logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada.

3.2. Definición conceptual de variables

Variables independientes (X)

Las variables independientes de estudio son:

- Concentración de colorante textil: X_1
- Concentración de peróxido de hidrógeno: X_2
- pH inicial: X_3

Variables dependientes o respuesta (Y)

La variable dependiente de estudio es:

- Reducción del colorante textil directo: Y

3.2.1. Operacionalización de variables

Tabla 4
Matriz de operacionalización de variables

Variable dependiente	Dimensiones	Indicadores	Técnicas
Y = Reducción del colorante textil directo	Absorbancia del colorante textil directo en una solución modelo.	$\% R = \frac{(A_0 - A_f)}{A_0} \times 100$	Espectrofotometría UV-Visible. (NCASI METHOD COLOR 71.01)
Variables independientes	Dimensiones	Indicadores	Técnicas
X ₁ = Concentración de colorante textil	ppm	X _{1,1} = 10 X _{1,2} = 15 X _{1,3} = 20	Preparación de soluciones
X ₂ = Concentración de peróxido de hidrógeno	%W/W	X _{2,1} = 10% X _{2,2} = 30% X _{2,3} = 50%	Valoración de Óxido-Reducción con permanganato de potasio (KMnO ₄), diluciones.
X ₃ = pH inicial	pH _o	X _{3,1} = 3 X _{3,1} = 6 X _{3,3} = 10	Medición directa con pH metro

Donde:

$X_{1,1}$: Factor 1, nivel 1

$X_{1,2}$: Factor 1, nivel 2

$X_{1,3}$: Factor 1, nivel 3

$X_{2,1}$: Factor 2, nivel 1

$X_{2,2}$: Factor 2, nivel 2

$X_{2,3}$: Factor 2, nivel 3

$X_{3,1}$: Factor 3, nivel 1

$X_{3,2}$: Factor 3, nivel 2

$X_{3,3}$: Factor 3, nivel 3

IV.DISEÑO METODOLÓGICO

4.1. Tipo y diseño de investigación

Tipo de investigación: Investigación aplicada.

“La investigación aplicada está dirigida a determinar a través del conocimiento científico, los medios (metodologías, protocolos y tecnologías) por los cuales se puede cubrir una necesidad reconocida y específica” (Peruano, 2018).

Diseño de investigación: Diseño experimental.

“Los experimentos manipulan tratamientos, estímulos, influencias o intervenciones (denominadas variables independientes) para observar sus efectos sobre otras variables (las dependientes) en una situación de control”. (Hernández, 2014)

A continuación, veamos el diagrama general del proceso en la figura 5:



Figura 5. Diagrama general del proceso de oxidación avanzada (POA)

Donde:

X₁ = Concentración de colorante textil.

X₂ = Concentración de peróxido de hidrógeno.

X₃ = pH inicial.

Y = Reducción del colorante textil directo (% Reducción)

Manipulando 3 variables (factores, parámetros), se midieron los efectos que éstas tienen sobre la variable dependiente o respuesta; posteriormente los resultados obtenidos en la experimentación fueron analizados. El análisis arrojó conclusiones y recomendaciones que pueden ser tomados en cuenta para investigaciones futuras en el uso de esta tecnología para la reducción de colorantes textiles en soluciones acuosas.

4.1.1. Diseño de experimentos – Método de Taguchi

El método de Taguchi es una técnica estadística que permite determinar los efectos de los parámetros de operación, los factores más influyentes en el proceso; así como también los niveles óptimos para cada factor, con solamente un pequeño número de experimentos. (Mohammadi & Ali Safavi, Application of Taguchi method in optimization of desalination by vacuum membrane distillation, 2009).

Además, complementa dos áreas importantes en el diseño de experimentos:

- 1) Define las matrices ortogonales (determina el número de pruebas especificando las condiciones para cada prueba).
- 2) Diseña un método estándar para el análisis de resultados.

El método de Taguchi se basa en una serie de pasos que veremos a continuación:

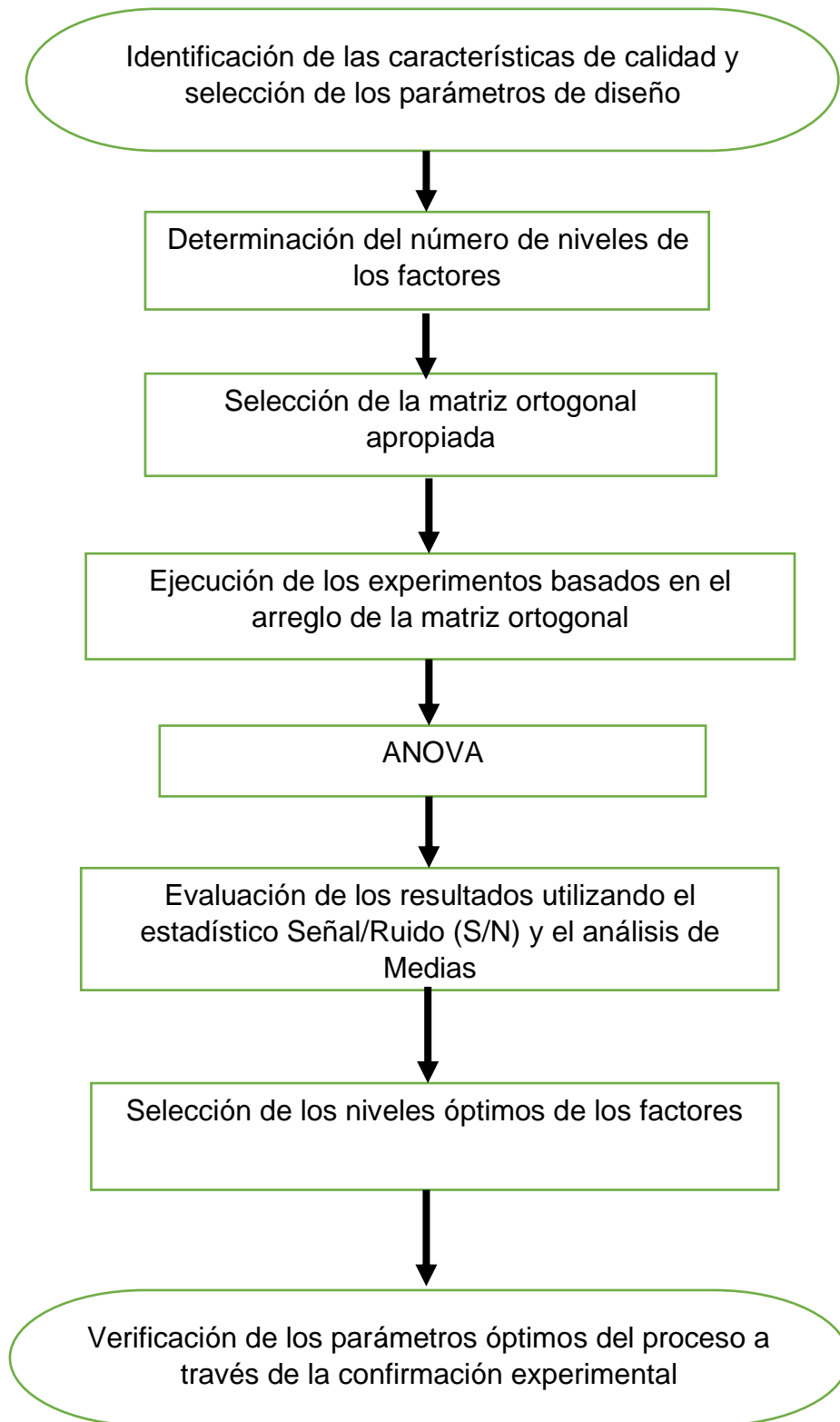


Figura 6. Pasos de ejecución del método de Taguchi
Fuente: Adaptado de Gönder, Kaya, Vergili, & Barlas (2010).

En la siguiente tabla se muestran los factores (variables, parámetros) y niveles de operación seleccionados para estudiar la reducción de colorante textil en una solución modelo, llevado a cabo en un módulo de oxidación avanzada.

Tabla 5
Factores y niveles de operación

Factores	Notación	Niveles		
		Bajo	Medio	Alto
Concentración de colorante textil (ppm)	X_1	10	15	20
Concentración de peróxido de hidrógeno (%W/W)	X_2	10	30	50
pH inicial	X_3	3	6	10

En este estudio se tomó como característica de calidad el porcentaje de reducción de colorante textil en la solución modelo.

La matriz ortogonal L_9 tres factores a tres niveles en 9 corridas experimentales que brinda Taguchi, indica que cada fila de la matriz representa a una corrida, con una combinación específica de parámetros a diferentes niveles. (Véase Tabla 6)

Como estadístico de desempeño, Taguchi propone a la razón Señal/Ruido (S/N), que se calcula para cada combinación de factores y se analizó como otra variable de respuesta adicional a la que el estudio presenta. La mejor combinación de factores es aquella que maximizó a la Señal/Ruido. (Gutierrez & De la Vara, 2008). Esta premisa también se corroboró por la gráfica del análisis de Medias.

Tabla 6
Matriz ortogonal Taguchi L₉

Corrida experimental	Parámetros de operación		
	[Colorante] (ppm)	[Peróxido de hidrógeno] (%W/W)	pH inicial
1	10	10	3
2	10	30	6
3	10	50	10
4	15	10	6
5	15	30	10
6	15	50	3
7	20	10	10
8	20	30	3
9	20	50	6

Fuente: Minitab 18

4.2. Método de investigación

El experimento se llevó a cabo en 4 etapas, según lo establecido en el diagrama de flujo de la figura 7.

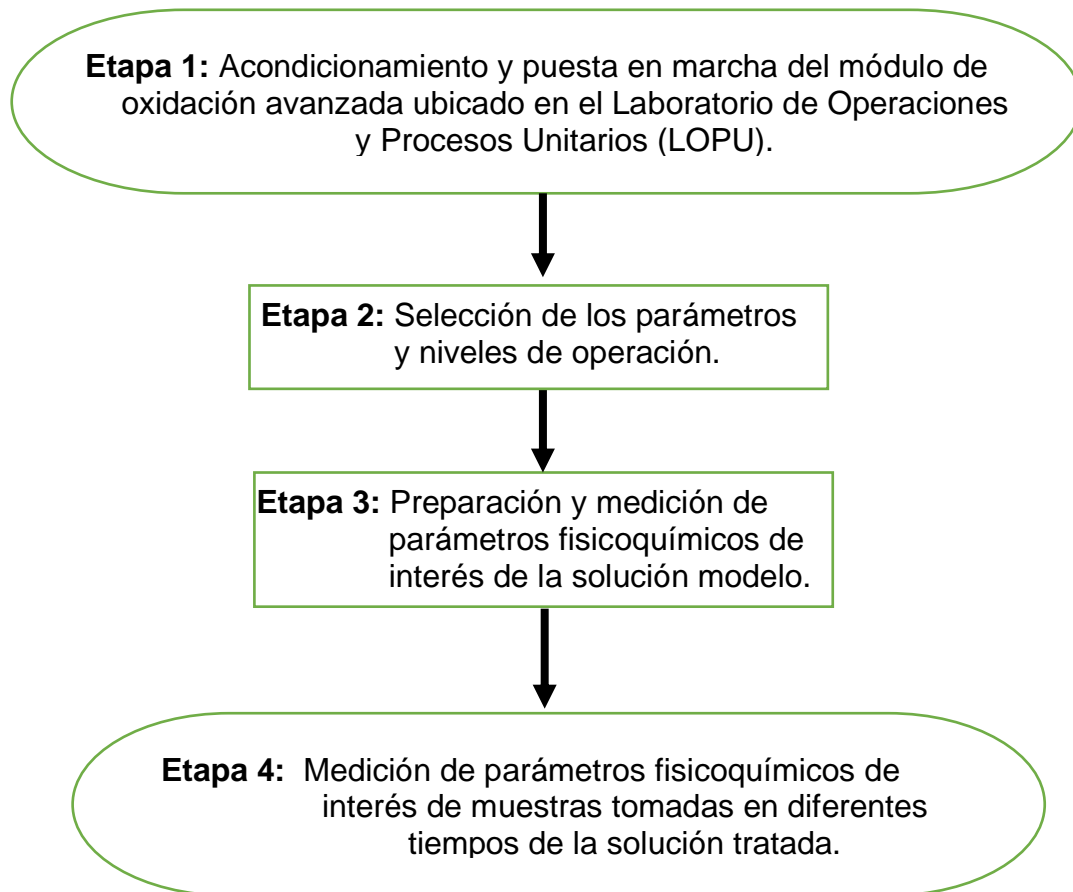


Figura 7. Etapas del método de investigación

4.2.1. Módulo experimental de Oxidación Avanzada

El módulo experimental está compuesto por:

- Tanque de almacenamiento para la solución modelo, hecho de acrílico de dimensiones 25x40x40 cm³.
- Válvula tipo bola, a la salida del tanque, para la toma de muestras.
- Electrobomba de agua, marca *Pentax*.
- Lámpara UV de 48 Watts, marca *Sterilight*, por la cual la solución modelo más la solución oxidante utilizada (peróxido de hidrógeno) fueron irradiadas.
- Rotámetro marca *Hydronix*, para lectura directa del caudal en litros por minuto (LPM).
- Filtro sin cartucho, para homogenizar la corriente de salida de la lámpara UV.

Todas las líneas están hechas de tubo 1/2" PVC.

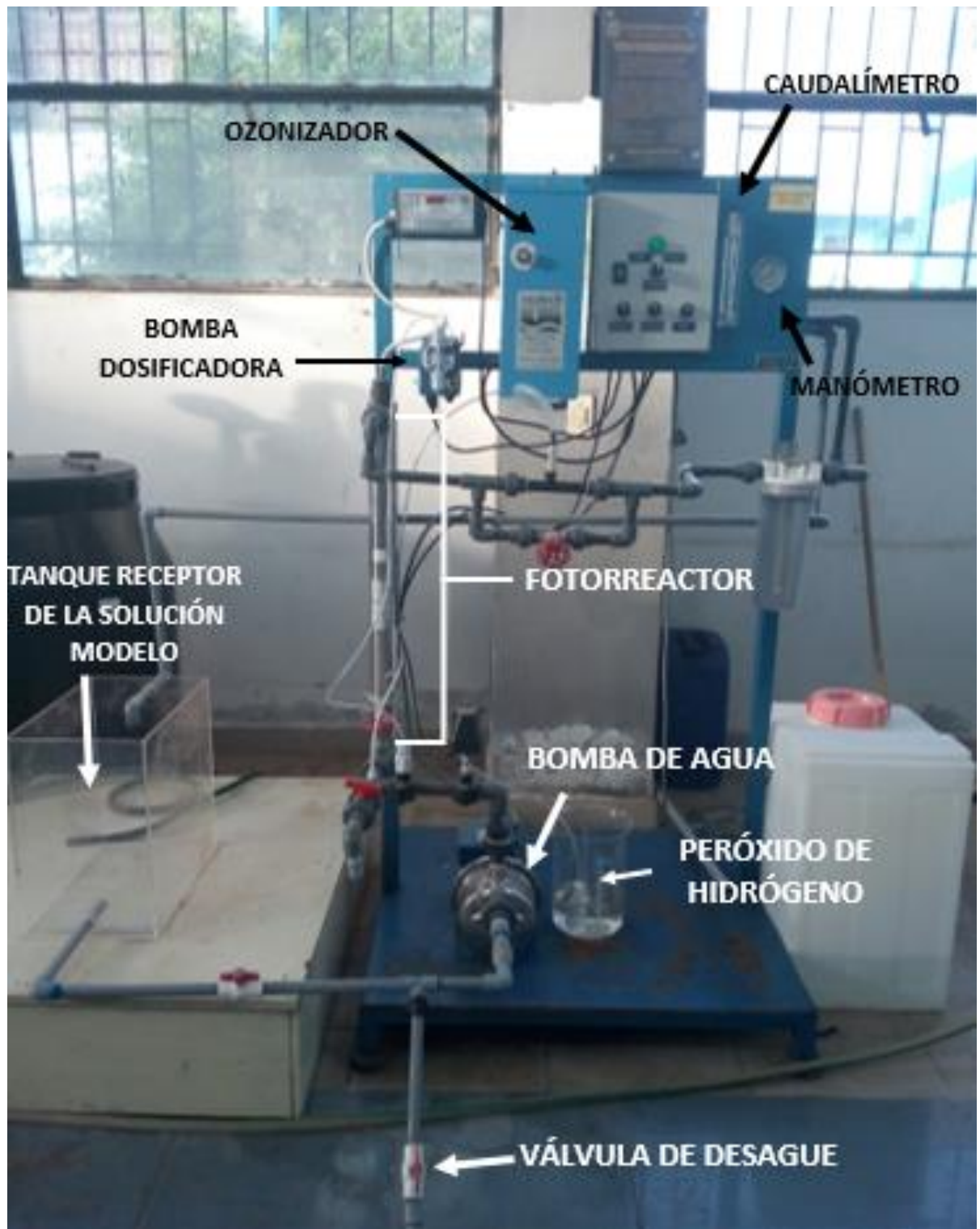


Figura 8. Módulo de oxidación avanzada

Las siguientes figuras muestran el avance a través de las etapas del método de investigación:

Etapa 1:

- Se instaló un tanque de almacenamiento para la solución modelo.

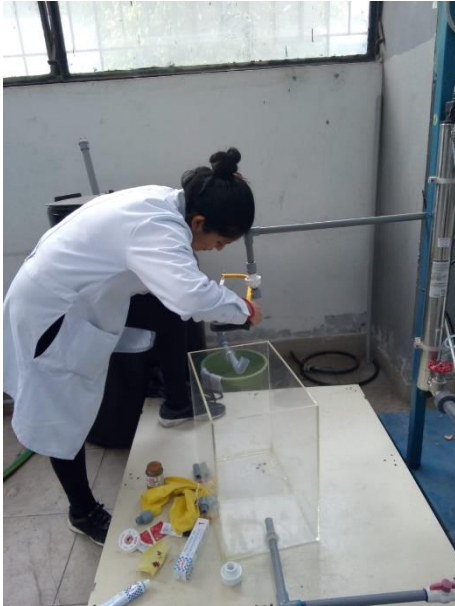


Figura 9. Instalación del tanque de almacenamiento de muestra

- Se realizaron precorridas experimentales en el módulo de oxidación avanzada; con la finalidad de medir su operatividad, verificar la decoloración de soluciones modelo con diferentes colorantes textiles, determinar el caudal de operación adecuado para la bomba y dosificaciones de la solución oxidante.





Figura 10. Pruebas de prefactibilidad con distintos colorantes

Etapa 2:

- Se efectuaron los cálculos pertinentes para preparar las soluciones modelo a diferentes concentraciones de colorante (Véase Tabla 5).
- Se realizaron valoraciones redox con permanganato de potasio (KMnO_4); véase el análisis volumétrico en los anexos, para determinar las concentraciones de las soluciones de peróxido de hidrógeno (Véase Tabla 5)



Figura 11. Análisis volumétrico de permanganometría

- Para medir el pH inicial de las soluciones modelo se utilizó un peachímetro portátil marca *Hanna Checker HI98103*. El pH inicial de las soluciones fue ajustado con soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) y/o ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrados según los niveles de estudio (Véase Tabla 5).



Figura 12. Uso del peachímetro portátil para ajuste de pH inicial

Etapas 3:

- Preparación de la solución modelo. La solución modelo contenía colorante textil *Naranja Direct 39*, que hizo las veces de contaminante, disuelto en agua destilada. Para homogenizar la solución, se hizo recircular aproximadamente 5 minutos por todo el circuito del módulo.

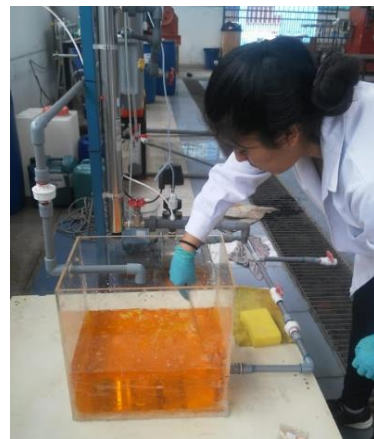


Figura 13. Preparación de la solución modelo

- Se añadió el oxidante; solución acuosa de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en una probeta.

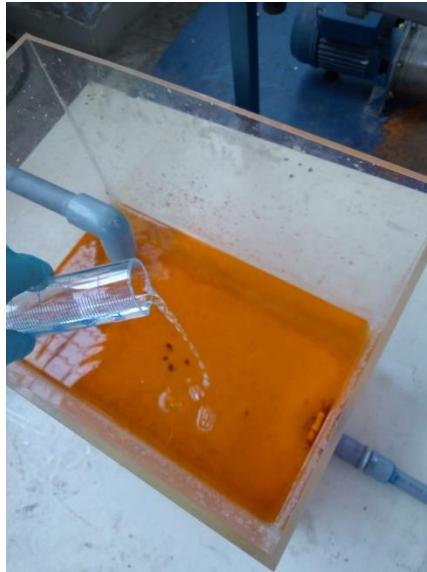


Figura 14. Adición de solución oxidante

- Se midió el pH inicial y la temperatura in situ con un termómetro de vidrio de inmersión total de marca *Giardino*.



Figura 15. Medición del pH inicial en el tanque de almacenamiento

- Se reguló el caudal de operación de la bomba. La lectura del caudal de la solución modelo que circuló por el módulo de oxidación avanzada fue de lectura directa medida con el rotámetro/caudalímetro instalado en el módulo. En esta investigación el caudal fue de 2,5 LPM (litros por minuto) y se mantuvo constante.



Figura 16. Rotámetro en módulo de oxidación avanzada

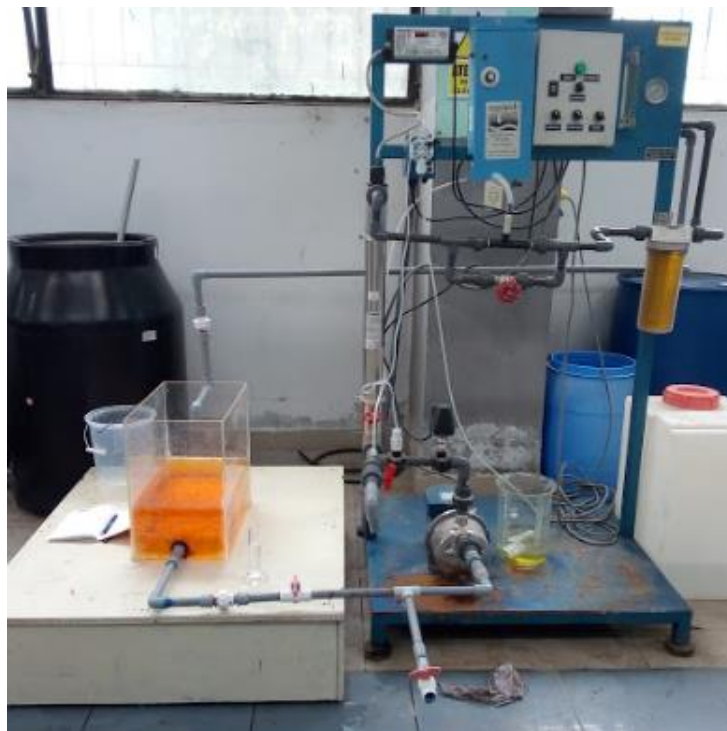


Figura 17. Módulo de oxidación avanzada con solución modelo.

Etapa 4:

- Se muestreó cada 30 minutos durante 3 horas; se monitoreó insitu el pH y la temperatura. Las muestras fueron conservadas en frío.



Figura 18. Toma de muestra, medición de pH y conservación en frío



Figura 19. Muestras tomadas cada 30 minutos

- La medición de la absorbancia se realizó mediante un espectrofotómetro VIS portátil DR 1900 marca HACH., la longitud de onda (λ) fue de 465 nanómetros según lo normado por NCASI METHOD COLOR 71.01



Figura 20. Espectrofotómetro VIS DR 1900 HACH



Figura 21. Lectura de absorbancias de muestras en el espectrofotómetro

4.3. Población y muestra

Población

135 L de solución acuosa de colorante textil directo *Naranja Direct 39* fueron preparados en el Laboratorio de Operaciones y Procesos Unitarios (LOPU). El colorante fue obtenido de Sociedad Química Mercantil S.A y fue usado directamente sin ningún tipo de tratamiento previo. El agua destilada provino de la Planta de Tratamiento de Agua del Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Química.

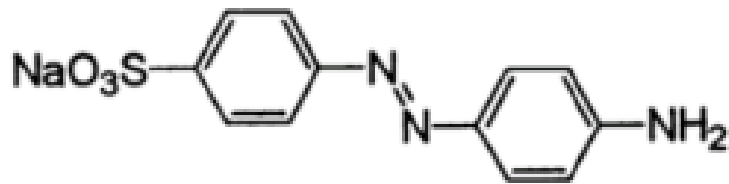


Figura 22. Estructura química de colorante naranja direct 39

Fuente: <http://www.worlddyevariety.com/direct-dyes/direct-orange-39.html>

Muestra

Este estudio presentó dos tipos de muestra:

- Muestra de corrida, 15 litros de solución modelo por cada corrida; en un circuito cerrado. Se manejó este volumen debido a que la capacidad del tanque de almacenamiento del módulo experimental es de 20 litros.
- Muestra de análisis, 100 ml. Se tomaron cada 30 minutos y llevadas a ser analizadas en el laboratorio.

4.4. Lugar de estudio

- Laboratorio de Química de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao.
- Laboratorio de Operaciones y Procesos Unitarios de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao (LOPU).

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de información.

4.5.1. Técnicas analíticas

- Valoraciones redox con Permanganato de potasio

Se realizaron análisis químico mediante valoraciones redox con permanganato de potasio para determinar la concentración en porcentaje peso-peso de peróxido de hidrógeno y diluciones. El peróxido de hidrógeno se compró en Químicos Goicochea SAC.



Figura 23. Análisis volumétrico con permanganato de potasio

- **Análisis de Espectrofotometría**

Mediante este análisis, se midió la Absorbancia, como una medida de color de las muestras de interés.



Figura 24. Análisis de absorbancia, blanco y muestra de interés

4.5.2. Instrumentos y/o equipos utilizados

- Peachímetro portátil marca *Hanna Checker HI98103*.
- Termómetro de vidrio de inmersión total de marca Giardino.
- Espectrofotómetro VIS portátil DR 1900 marca HACH.
- Balanza analítica Mettler Toledo AL204
- Módulo de Oxidación Avanzada.
- Material de vidrio como buretas, probetas, luna de reloj, bagueta, vaso de precipitado, pipetas, picetas, entre otros.

4.6. Análisis y procesamiento de datos

Para el análisis de los resultados experimentales, se utilizaron los softwares Excel y Minitab 18; mediante su aplicación se verificó la validación de la data con el análisis de residuales. Seguidamente se aplicó la metodología de Taguchi, la cual mediante el análisis de varianza (ANOVA) se determinó la significancia estadística y porcentaje de contribución de los factores de estudio (X_1 , X_2 , X_3) sobre la variable respuesta (Y).

Mediante la gráfica de medias y el estadístico Señal-ruido de Taguchi se determinó la combinación de factores y niveles que brindan los mejores resultados.

Posteriormente mediante el modelo matemático de Taguchi se verificó la mejor combinación del proceso, contrastando el valor pronosticado por el modelo con el promedio de los valores experimentales.

Finalmente, mediante la prueba t, se probó la hipótesis general de forma estadística.

V.RESULTADOS

5.1. Resultados descriptivos

5.1.1 Resultados experimentales obtenidos respecto a los parámetros de operación

En la siguiente tabla se muestran los resultados del porcentaje de reducción de color para cada corrida experimental efectuada mediante el proceso de oxidación avanzada H_2O_2 /UV.

Tabla 7

Porcentaje de reducción de color respecto a los parámetros de operación

N°	Parámetros de operación			% Reducción de color
	[Colorante] ppm	[Peróxido de hidrógeno] %W/W	pH inicial	
1	10	10	3	98.947
2	10	30	6	98.577
3	10	50	10	92.615
4	15	10	6	96.667
5	15	30	10	97.859
6	15	50	3	98.511
7	20	10	10	93.848
8	20	30	3	100.000
9	20	50	6	93.985

Se observa, de forma gráfica, el comportamiento de la variación del % Reducción de color en función del tiempo para las nueve corridas experimentales:

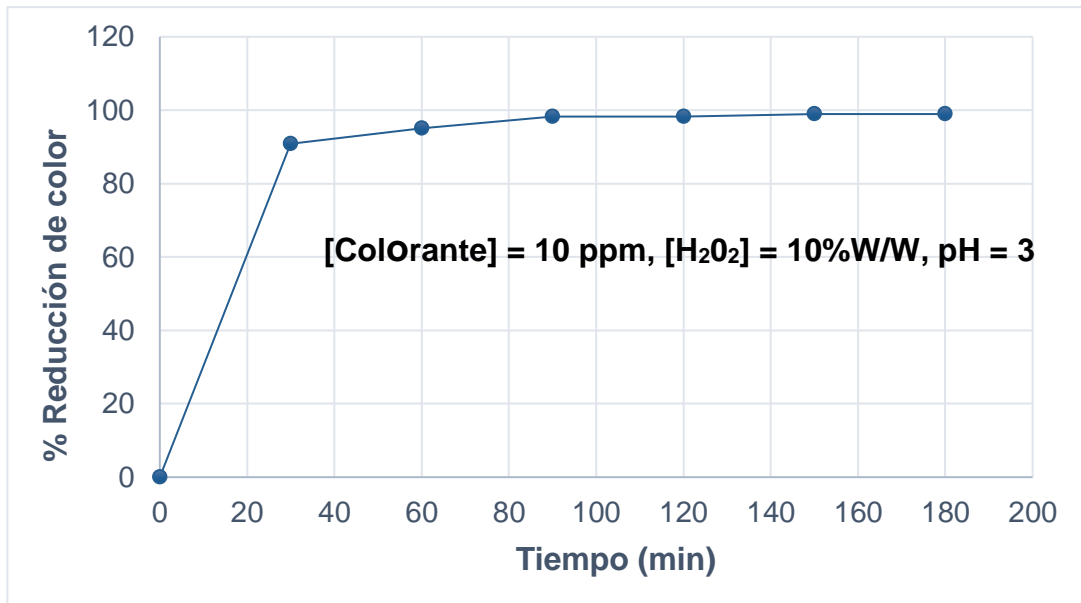


Figura 25. Variación del % de reducción de color a [Colorante] = 10 ppm, [H₂O₂] = 10% W/W, pH = 3

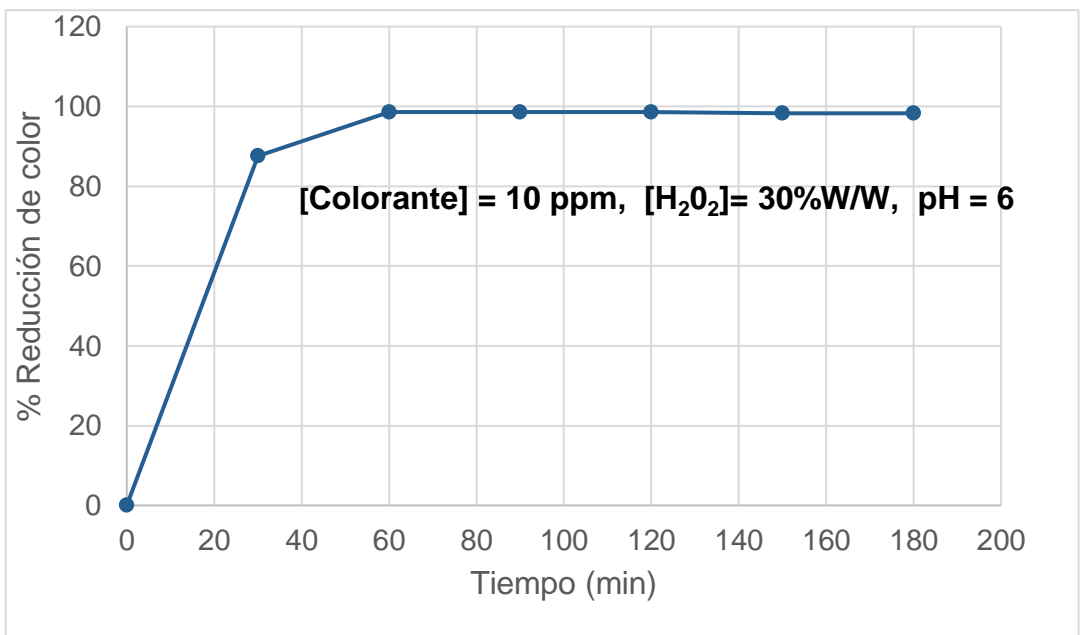


Figura 26. Variación del % de reducción de color a [Colorante] = 10 ppm, [H₂O₂] = 30%W/W, pH = 6

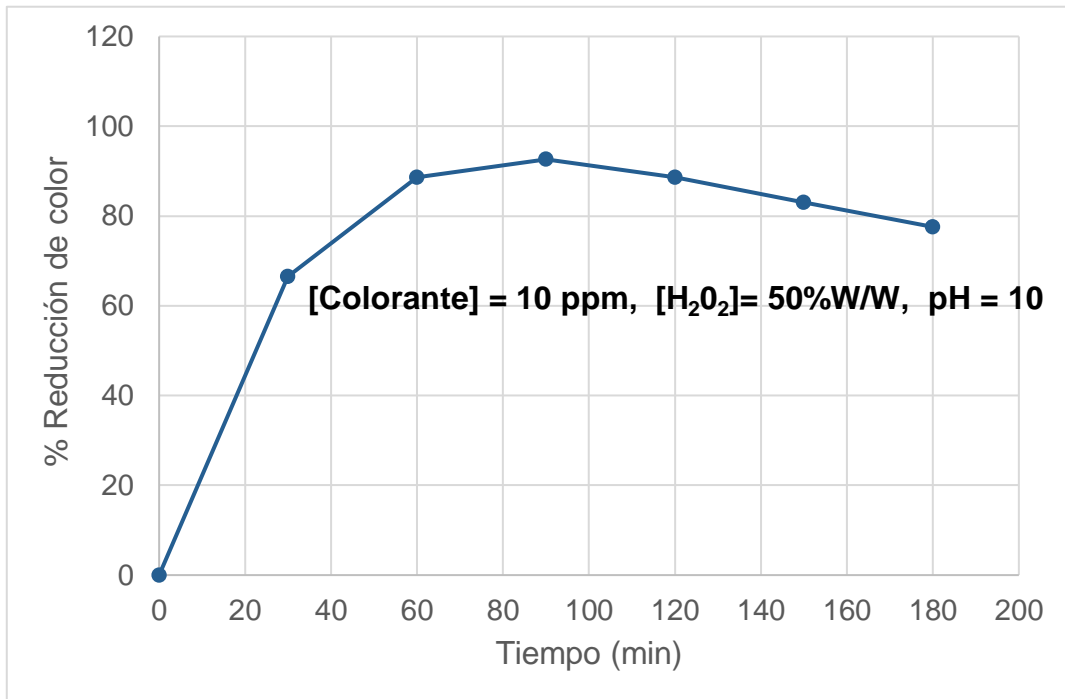


Figura 27. Variación del % de reducción de color a [Colorante] = 10 ppm, [H₂O₂] = 50%W/W, pH = 10

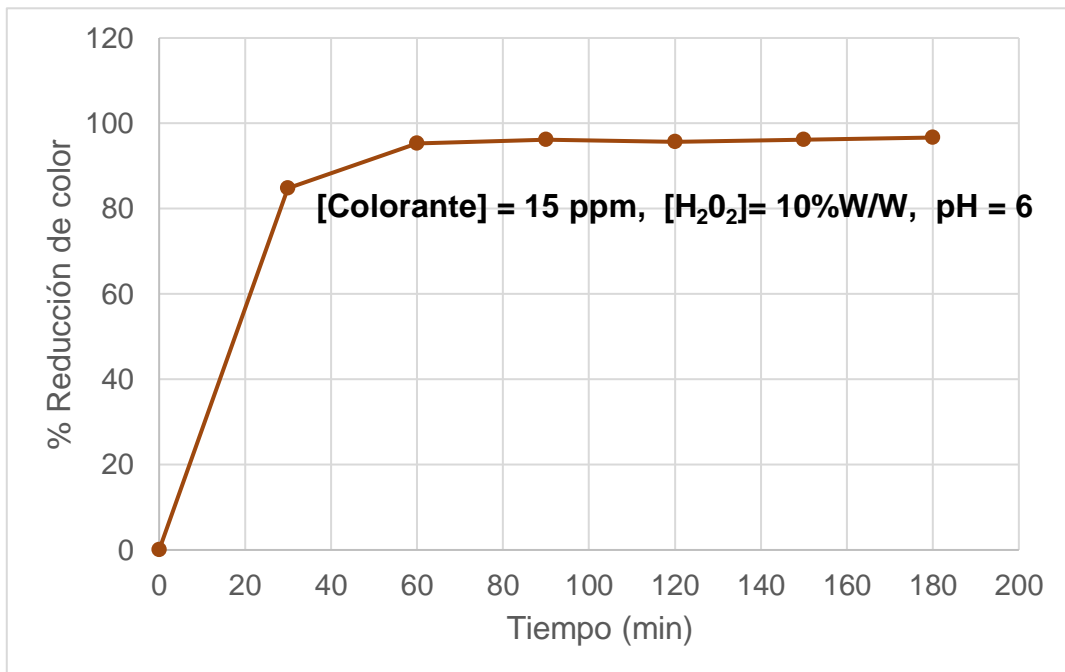


Figura 28. Variación del % de reducción de color a [Colorante] = 15 ppm, [H₂O₂] = 10%W/W, pH = 6

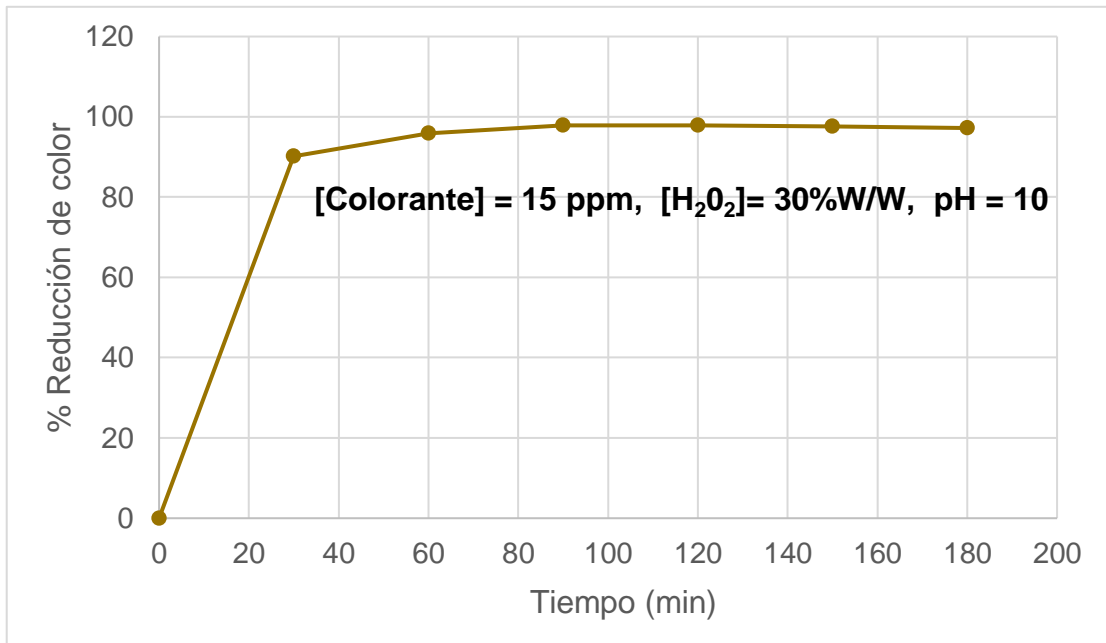


Figura 29. Variación del % de reducción de color a [Colorante] = 15 ppm, [H₂O₂] = 30%W/W, pH = 10

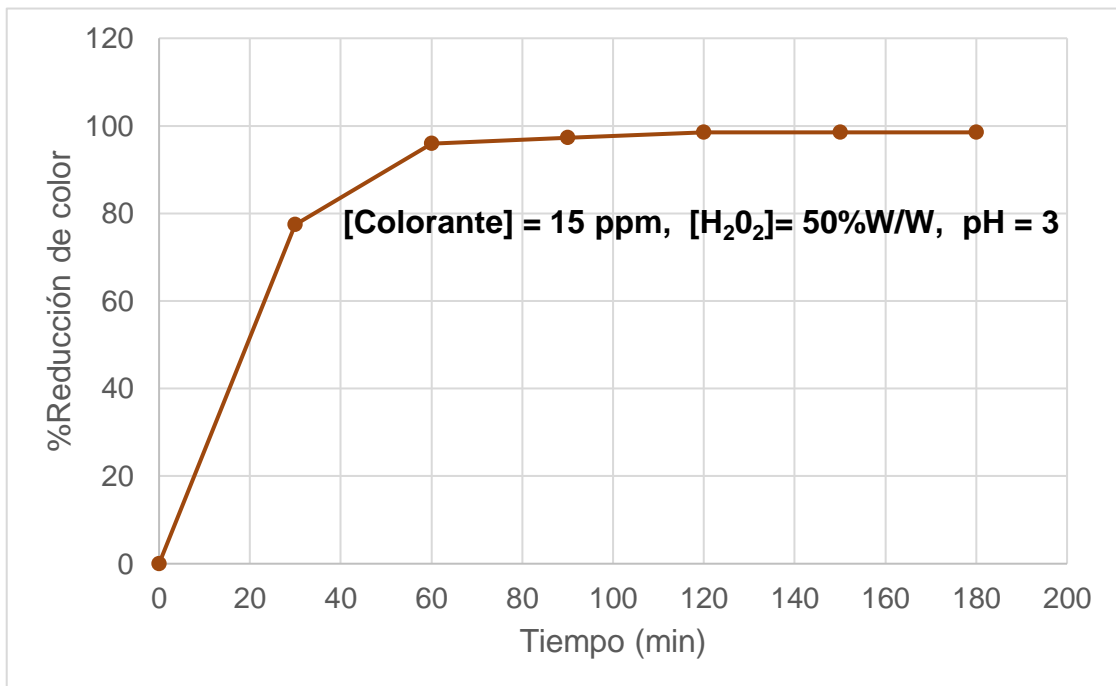


Figura 30. Variación del % de reducción de color a [Colorante] = 15 ppm, [H₂O₂] = 50%W/W, pH = 3

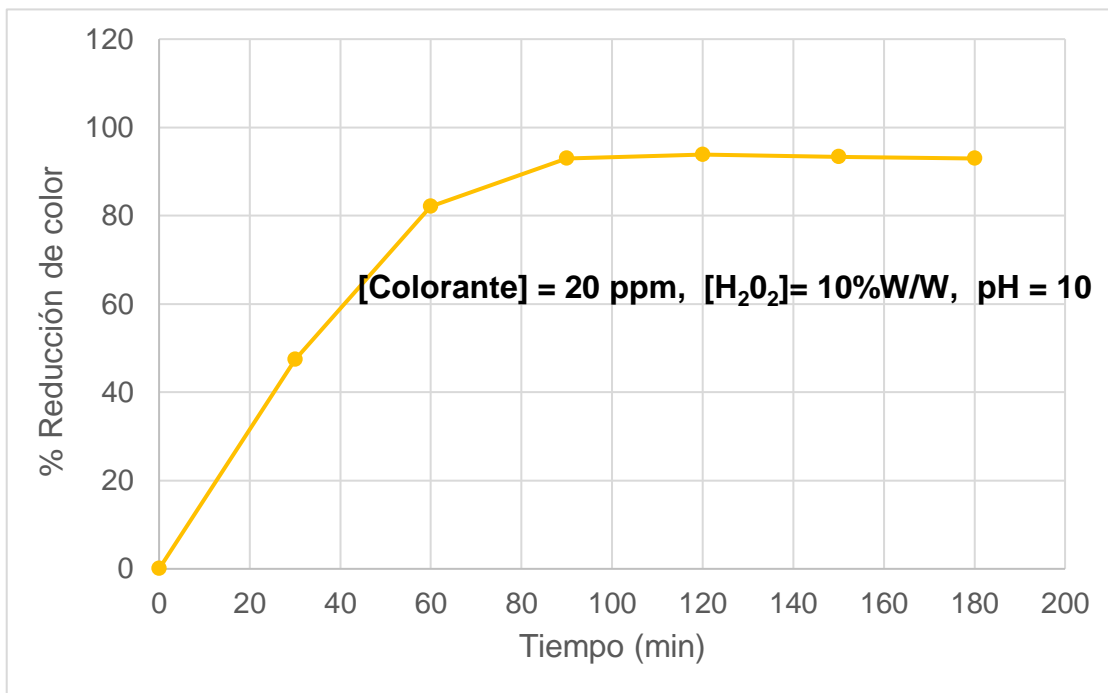


Figura 31. Variación del % de reducción de color a [Colorante] = 20 ppm, [H₂O₂] = 10%W/W, pH = 10

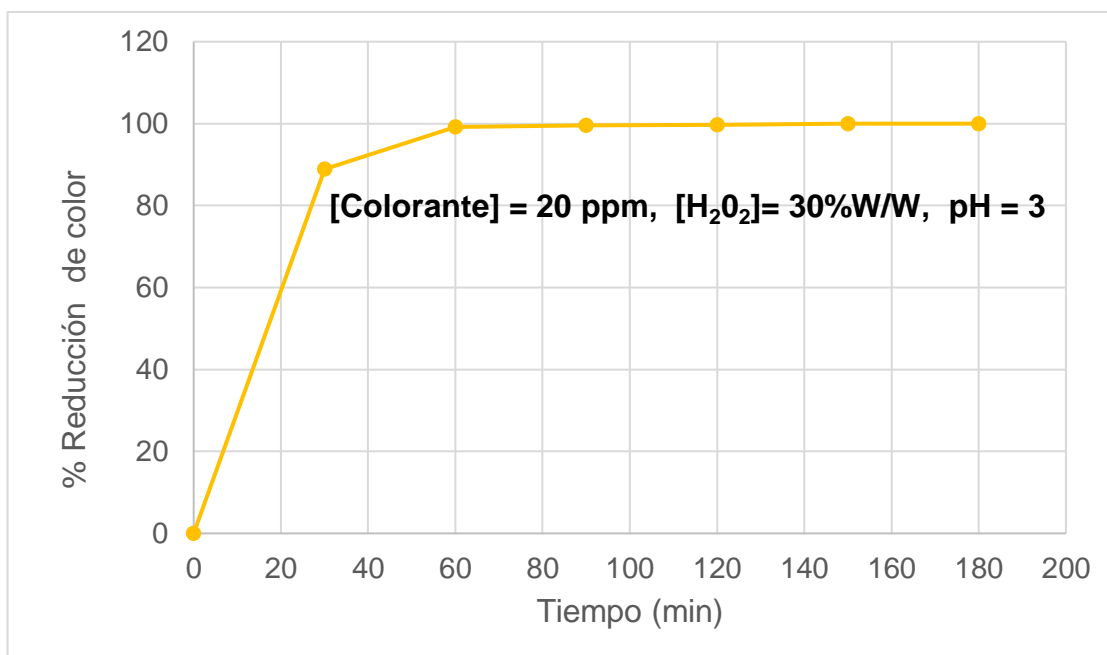


Figura 32. Variación del % de reducción de color a [Colorante] = 20 ppm, [H₂O₂] = 30%W/W, pH = 3.

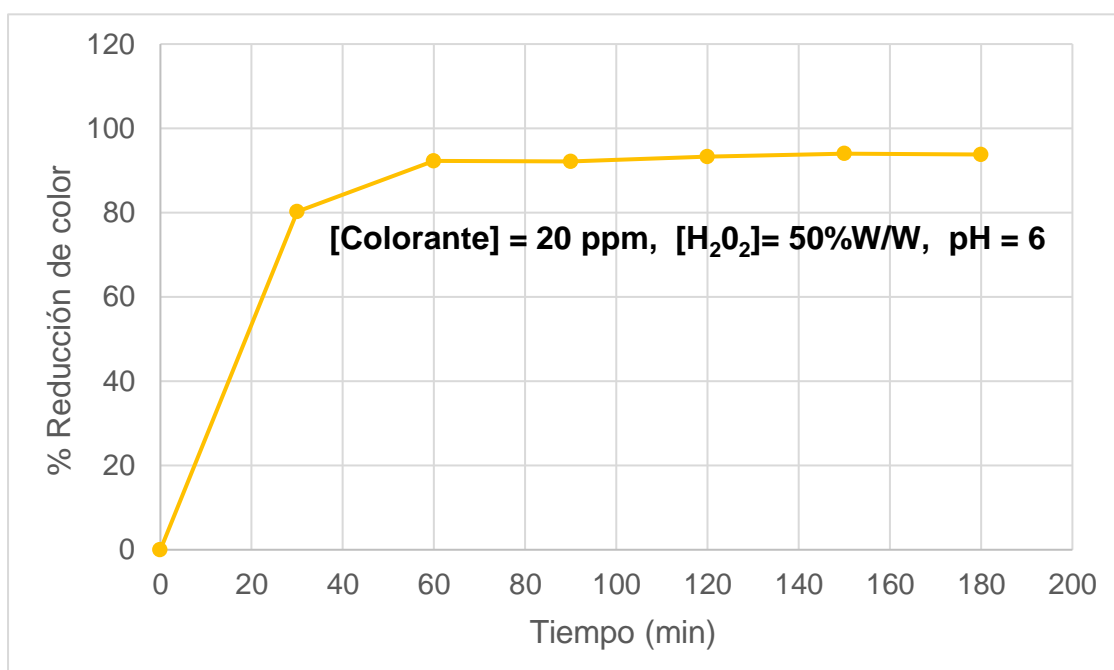


Figura 33. Variación del % de reducción de color a [Colorante] = 20 ppm, [H₂O₂] = 50%W/W, pH = 6

La medición de absorbancias fue fundamental para obtener los porcentajes de reducción de color; estos valores se observan en la siguiente tabla:

Tabla 8
Absorbancias vs parámetros de operación

N°	Parámetros de operación			Absorb. inicial	Absorb. final
	[Colorante] ppm	[Peróxido de hidrógeno] %W/W	pH inicial		
1	10	10	3	0.285	0.003
2	10	30	6	0.281	0.004
3	10	50	10	0.325	0.024
4	15	10	6	0.21	0.007
5	15	30	10	0.467	0.01
6	15	50	3	0.47	0.007
7	20	10	10	0.829	0.051
8	20	30	3	0.651	0
9	20	50	6	0.665	0.04

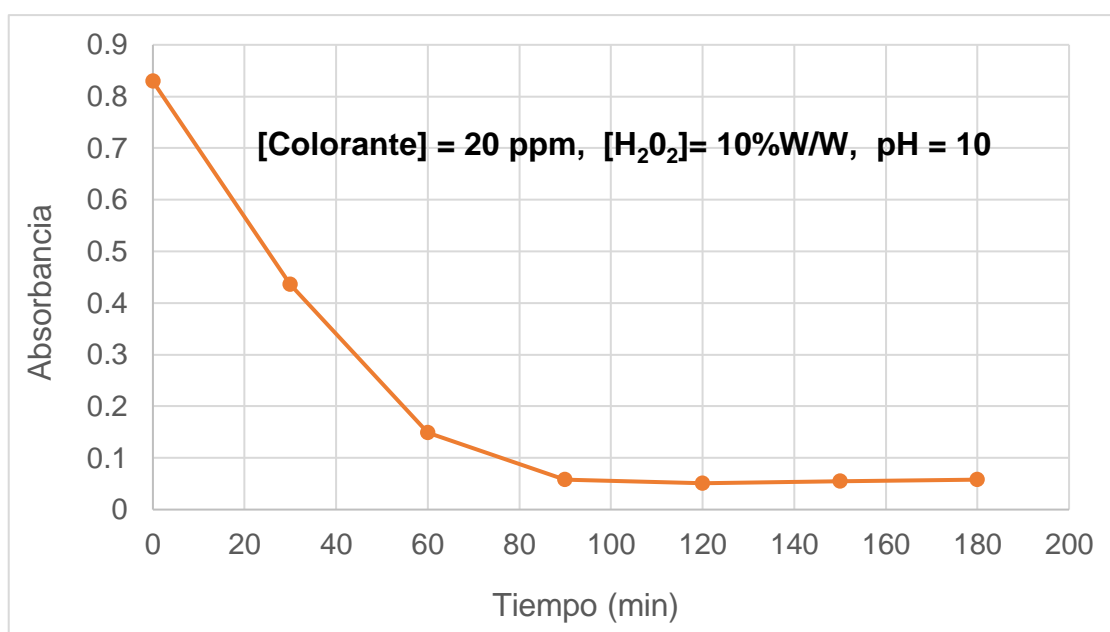


Figura 34. Absorbancia como función del tiempo

En la tabla 9, se observa el comportamiento del pH respecto a los parámetros de operación.

Tabla 9
pH vs parámetros de operación

N°	Parámetros de operación			pH final
	[Colorante] ppm	[Peróxido de hidrógeno] %W/W	pH inicial	
1	10	10	3	3
2	10	30	6	5.8
3	10	50	10	9.5
4	15	10	6	5.6
5	15	30	10	6.6
6	15	50	3	3
7	20	10	10	9.8
8	20	30	3	3.2
9	20	50	6	6.4

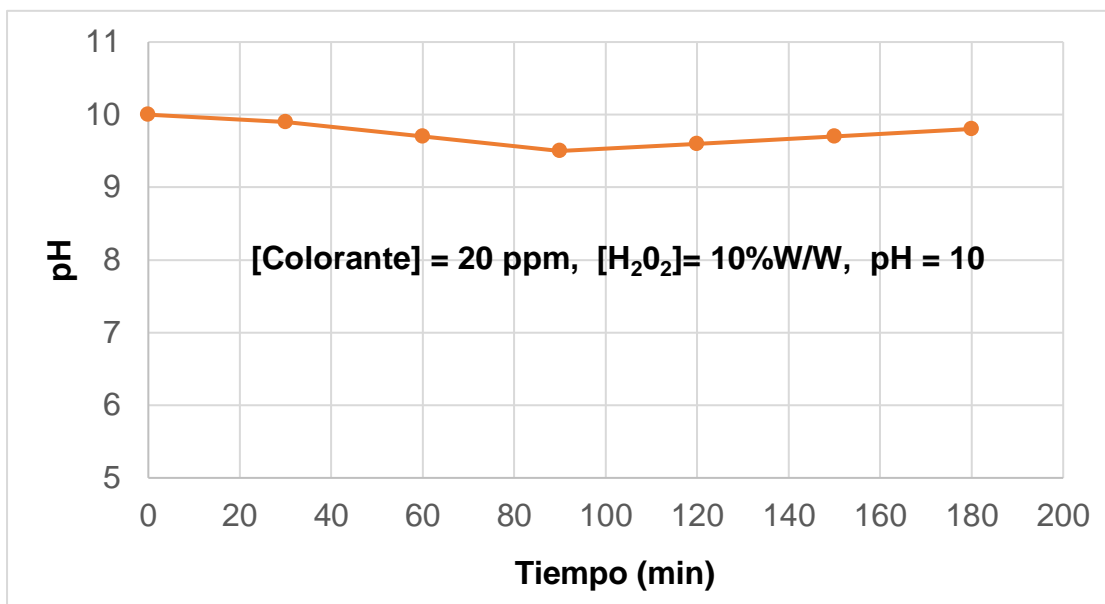


Figura 35. pH como función del tiempo

La temperatura fue otro parámetro monitoreado a lo largo del proceso experimental

Tabla 10
Temperatura vs parámetros de operación

N°	Parámetros de operación			Temp. Inicial (°C)	Temp. Final (°C)
	[Colorante] ppm	[Peróxido de hidrógeno] %W/W	pH inicial		
1	10	10	3	18	46
2	10	30	6	18	47
3	10	50	10	19	45
4	15	10	6	21	46
5	15	30	10	20	48
6	15	50	3	17	45
7	20	10	10	21	46
8	20	30	3	18	48.5
9	20	50	6	20	45

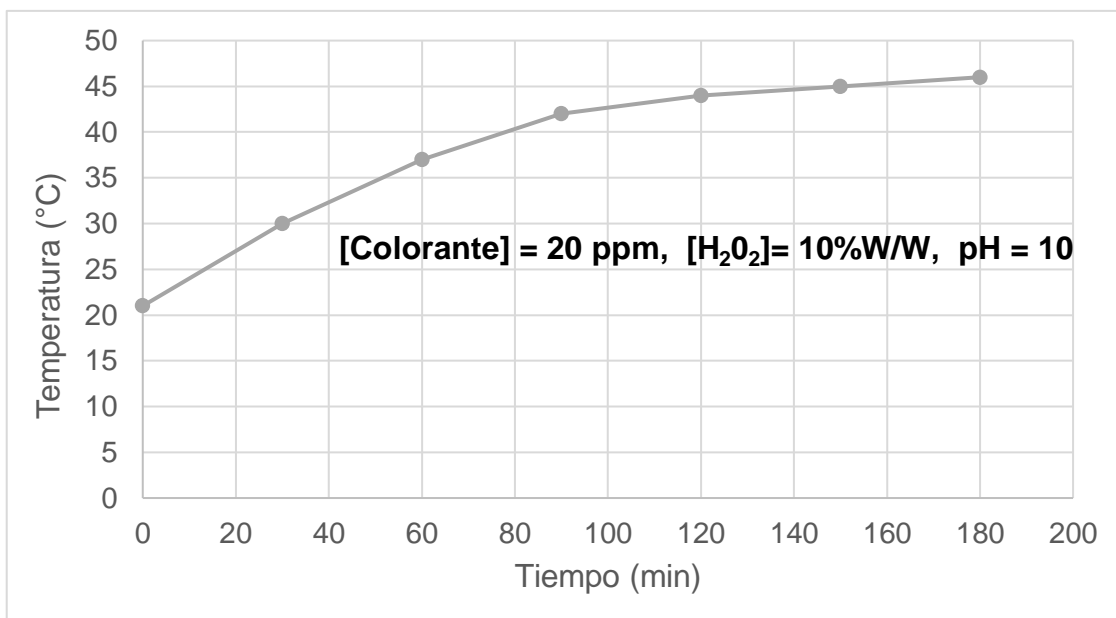


Figura 36. Temperatura como función del tiempo

5.1.2. Efectos de los parámetros de operación sobre el porcentaje de reducción de color

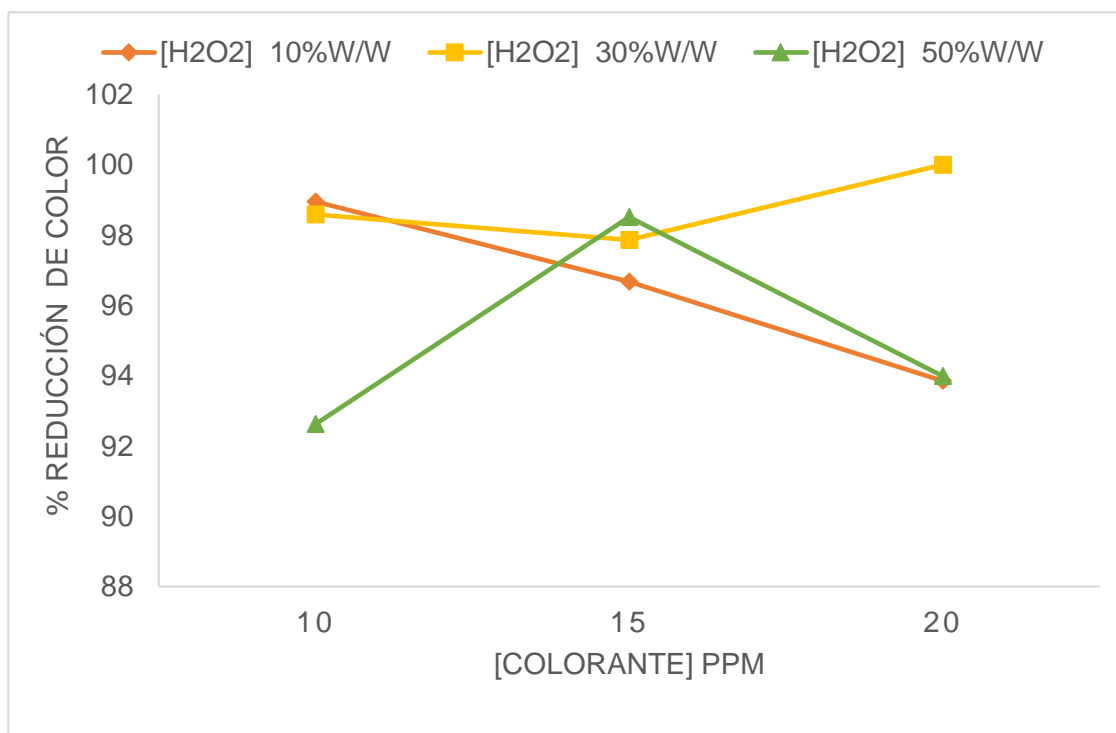


Figura 37. Efecto de [Colorante] a diferentes [H₂O₂]

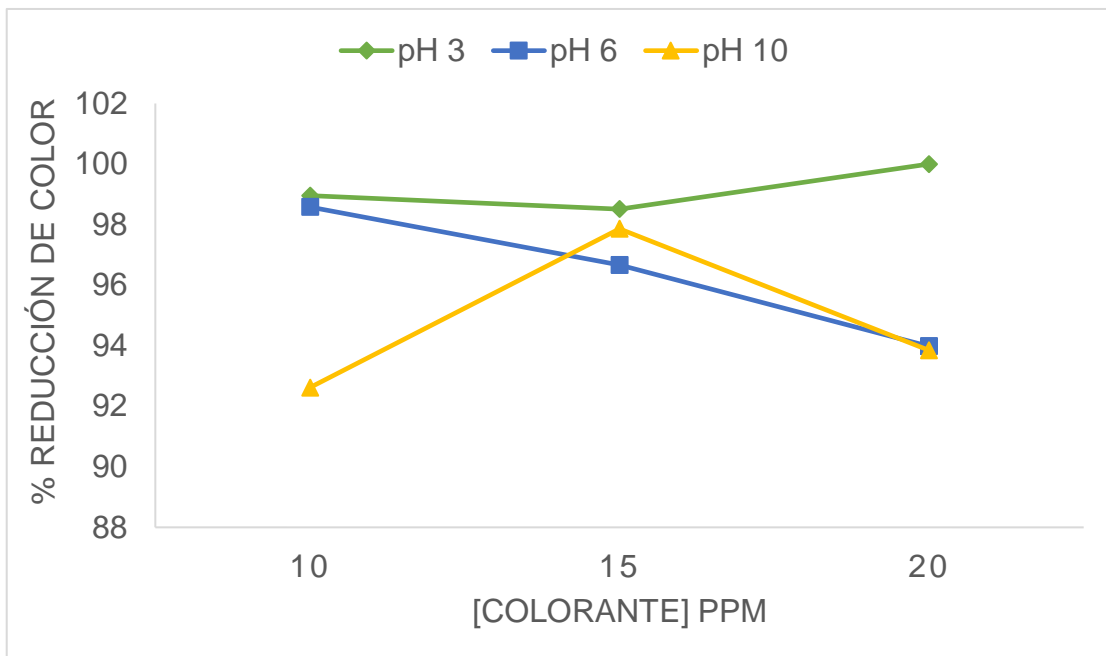


Figura 38. Efecto de [Colorante] a diferentes pH iniciales

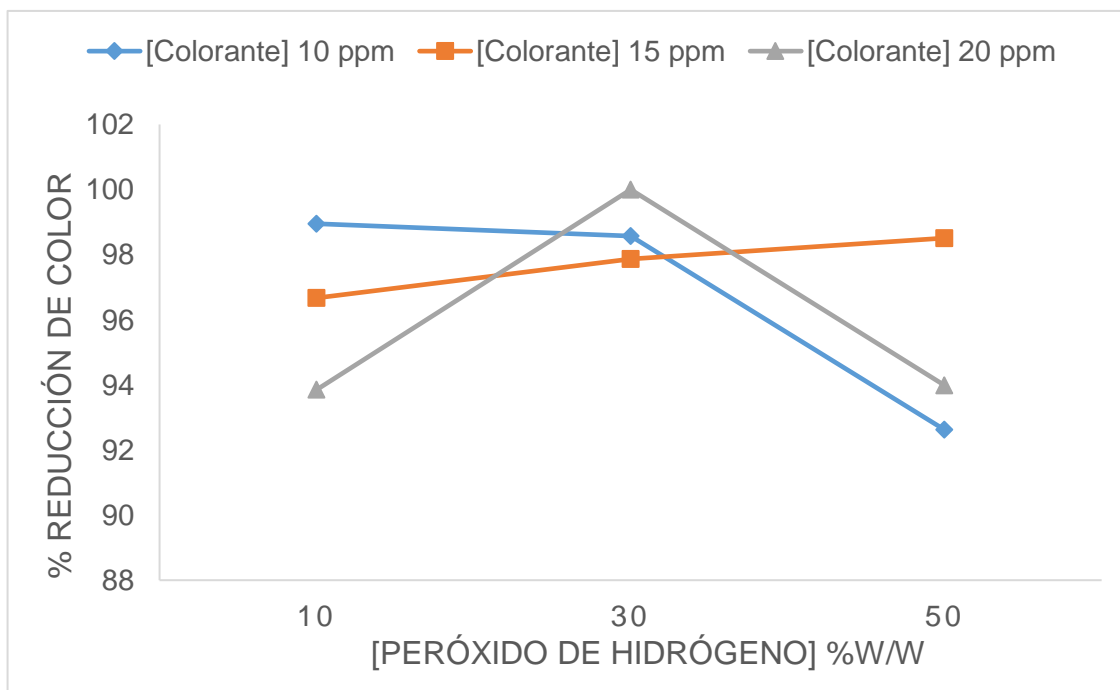


Figura 39. Efecto de [H₂O₂] a diferentes [Colorante]

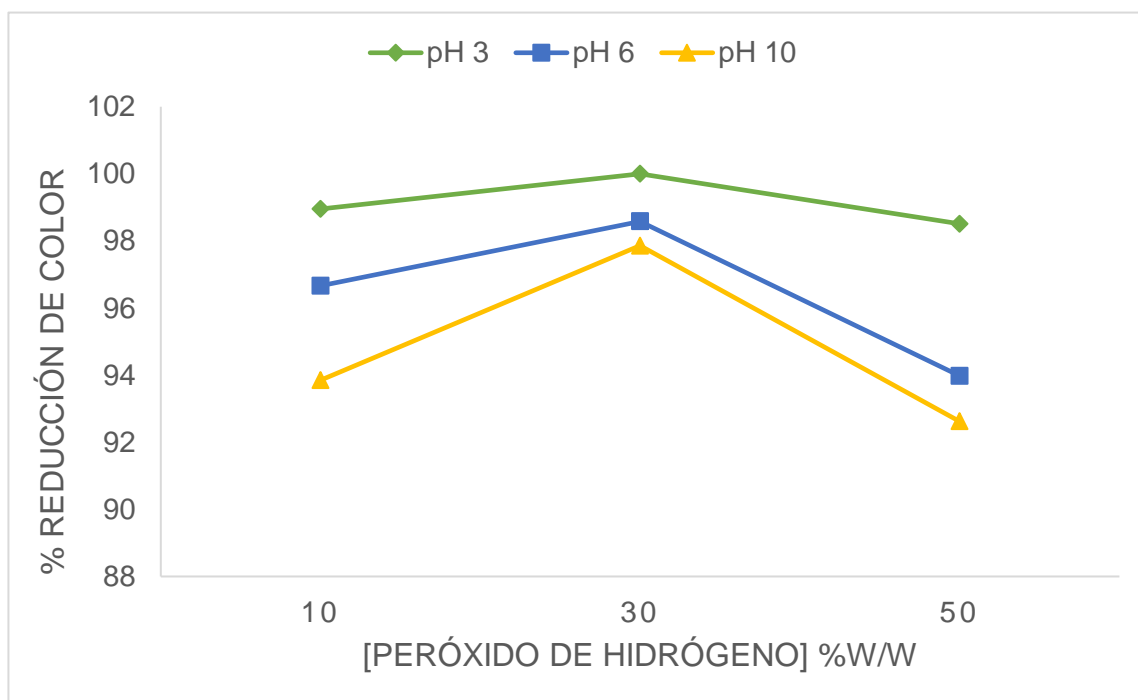


Figura 40. Efecto de $[H_2O_2]$ a diferentes pH iniciales

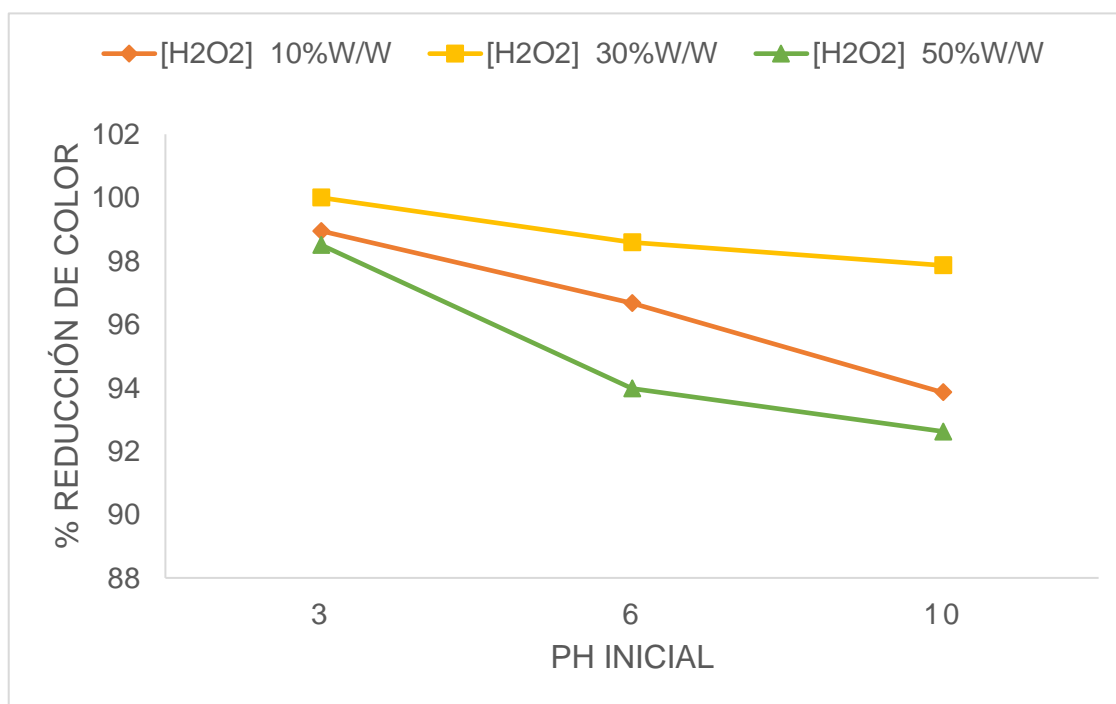


Figura 41. Efecto del pH inicial a diferentes $[H_2O_2]$

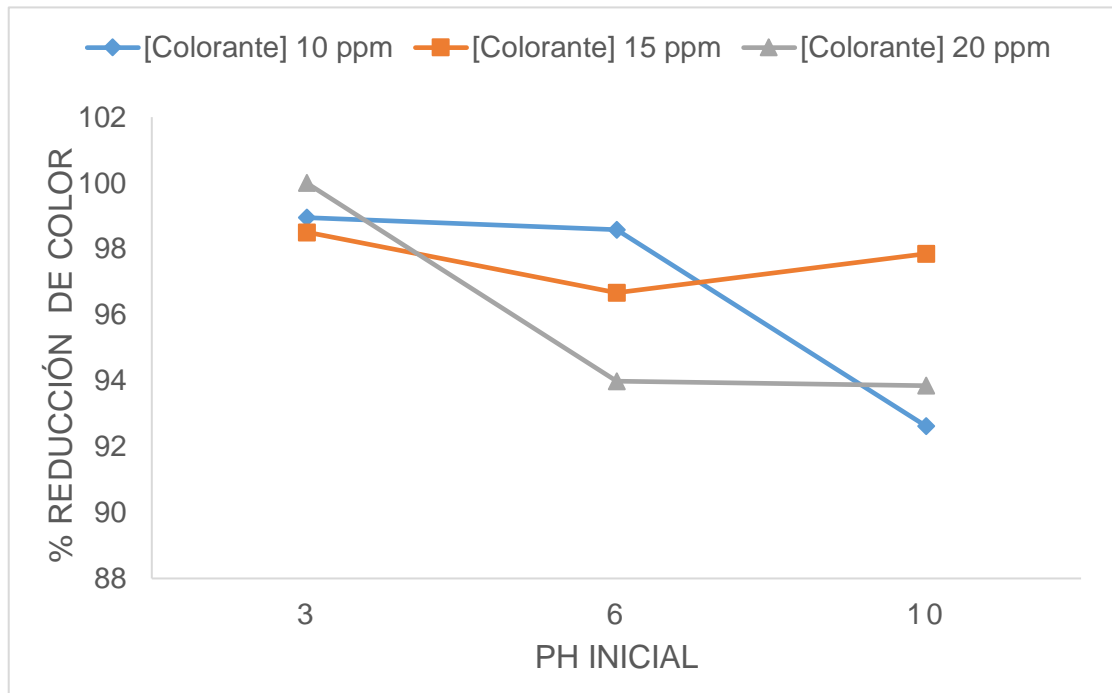


Figura 42. Efecto del pH inicial a diferentes [Colorante]

5.2. Resultados Inferenciales

5.2.1. Análisis de los Residuales

Los Residuales son generados por la diferencia entre la respuesta observada y la respuesta que se obtuvo por el modelo matemático en cada prueba experimental.

Los residuales deben cumplir los siguientes supuestos:

- Normalidad
- Varianza constante (igual varianza en los tratamientos)
- Independencia

A continuación, se analizó cada uno de ellos:

Normalidad

Para una prueba de normalidad, las hipótesis son las siguientes:

H₀: Los datos siguen una distribución normal.

H_i: Los datos no siguen una distribución normal. **P-valor**

Gráficamente se concluyó que el supuesto de normalidad es correcto ya que los puntos se ajustaron a la línea de distribución normal.

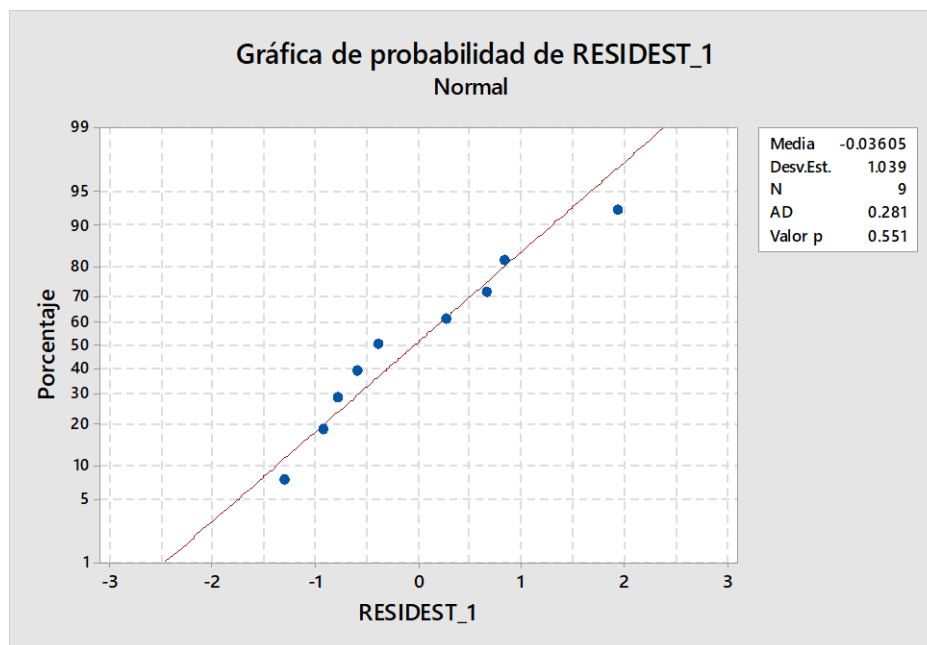


Figura 43. Supuesto de normalidad en análisis de residuales
Fuente: Minitab 18.

Varianza constante

Si los puntos se distribuyen de manera aleatoria en una banda horizontal (sin ningún patrón claro y contundente), entonces es señal que se cumple el supuesto de igual de varianza en los tratamientos, es decir que las varianzas entre tratamientos son iguales. Por el contrario, si se distribuyen con algún patrón claro y contundente, como una forma de “corneta o embudo”, entonces es señal que no se está cumpliendo el supuesto de varianza constante entre los diferentes tratamientos.

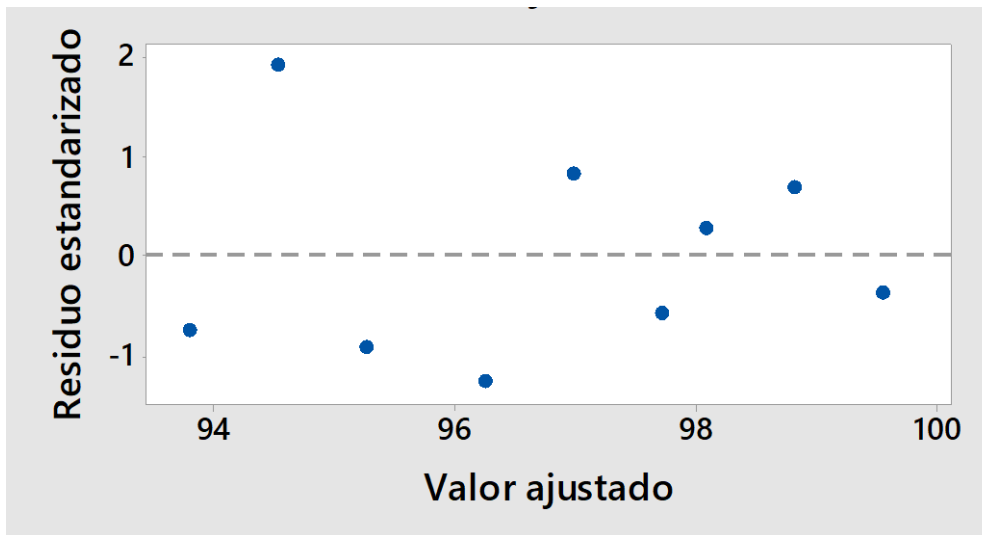


Figura 44. Supuesto de varianza constante en análisis de residuales
Fuente: Minitab 18.

Independencia

La independencia quiere decir que no existe influencia entre los tratamientos en el tiempo, es decir, si el resultado de un tratamiento tiene efecto sobre el resultado del experimento anterior.

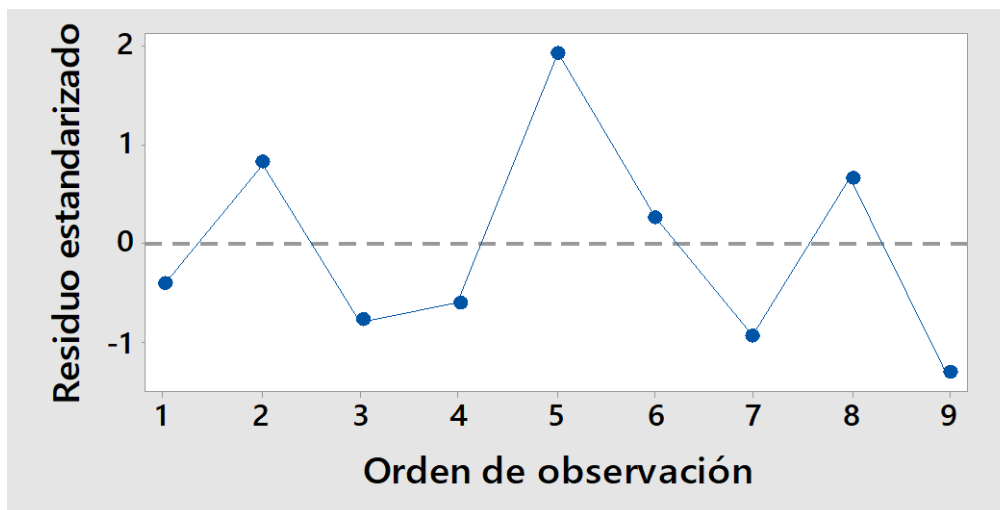


Figura 45. Supuesto de independencia en análisis de residuales
Fuente: Minitab 18.

5.2.2. Metodología de Taguchi – Análisis de varianza ANOVA

El ANOVA realizado por el software permitió visualizar los parámetros más efectivos en la obtención del máximo porcentaje de reducción de color de la solución modelo.

En el ANOVA se utiliza la distribución F como estadístico de prueba y nos indica qué parámetros del proceso tienen un efecto significativo en la obtención del mayor porcentaje de reducción del color. Cuanto más grande sea el valor de F, mayor es el efecto sobre la reducción de color. (Mohammadi & Ali Safavi, Application of Taguchi method in optimization of desalination by vacuum membrane distillation, 2009)

Tabla 10
Parámetros del análisis estadístico ANOVA

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Varianza	Valor F	Valor P	Contribución
[Colorante], ppm	2	4.5421	2.2710	8.18	0.109	8.08%
[H2O2], %W/W	2	21.7733	10.8866	39.23	0.025	38.73%
pH inicial	2	29.3489	14.6744	52.88	0.019	52.20%
Error	2	0.5550	0.2775			0.99%
Total	8	56.2192				100.00%

Fuente: Minitab 18.

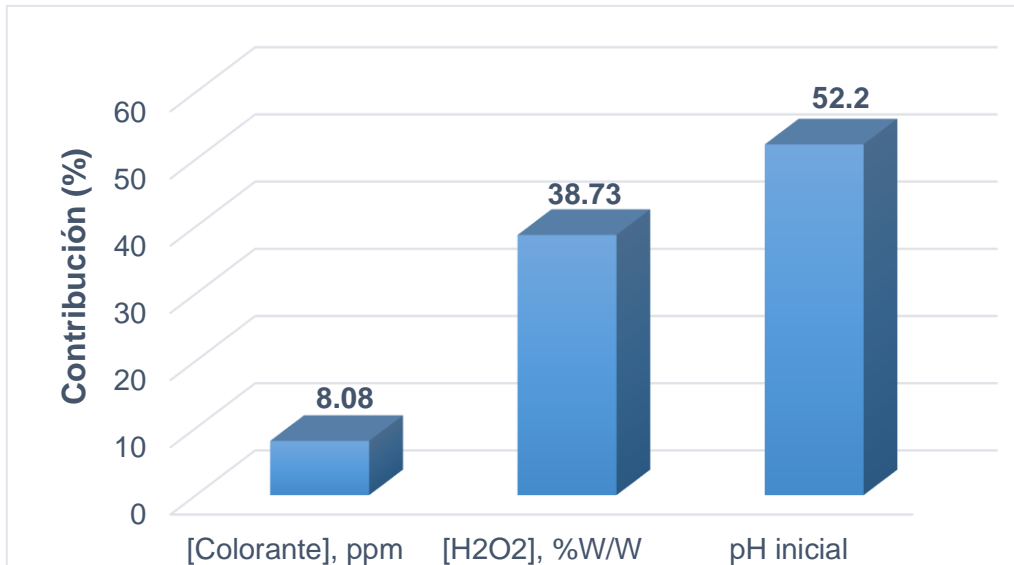


Figura 46. Contribución porcentual de factores de estudio en reducción de color

5.2.3. Análisis de Medias y estadístico Señal-ruido de Taguchi

Con el software estadístico Minitab 18, se obtuvo el análisis de Medias y de la Señal ruido. El análisis de las Medias y la Señal Ruido ayudaron en la elección de los niveles que optimizan el proceso.

Veamos el análisis de efectos principales para Medias:

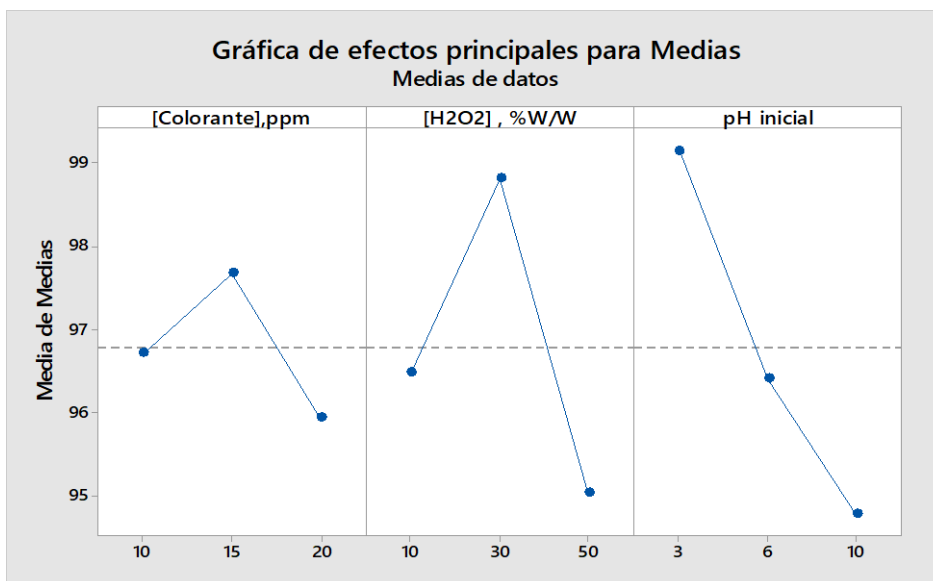


Figura 47. Efectos principales para medias de cada factor
Fuente: Minitab18.

Tabla 11
Respuesta para medias

Nivel	[Colorante] ppm	[H2O2] %W/W	pH inicial
1	96.72	96.49	99.15
2	97.68	98.81	96.41
3	95.94	95.04	94.78
Delta	1.74	3.78	4.38
Clasificar	3	2	1

Fuente: Minitab 18.

El análisis de la Señal Ruido (SN) presentó la misma tendencia respecto al análisis de Medias, a continuación, la gráfica de efectos principales para la SN:

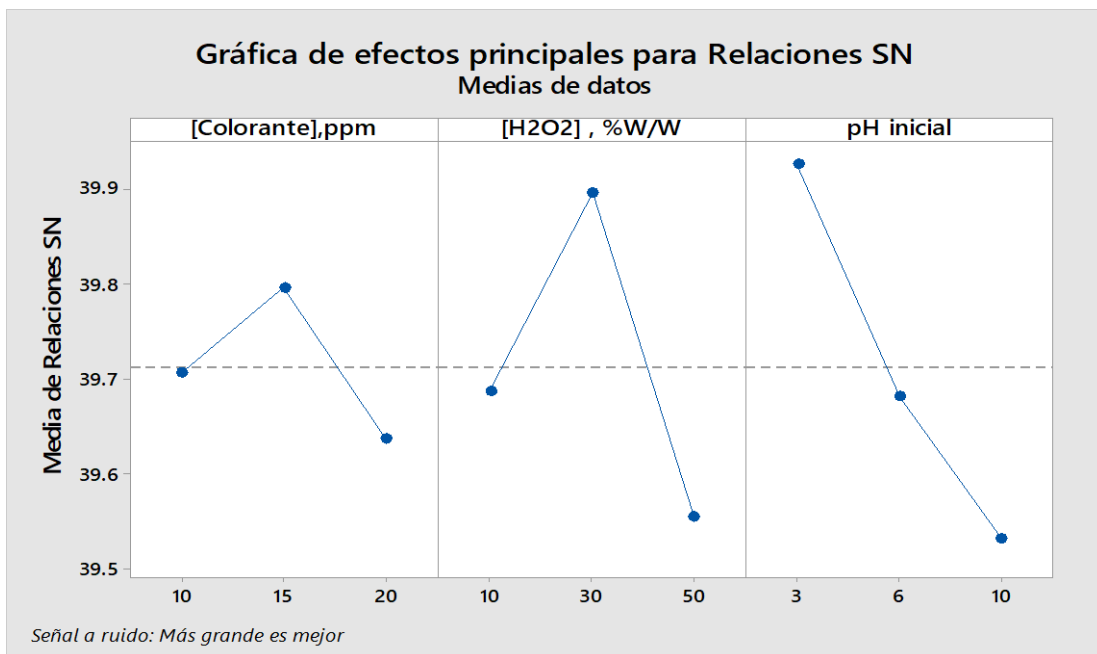


Figura 48. Efectos de cada factor en la señal ruido (SN)
Fuente: Minitab 18.

En las siguientes tablas se visualizan los coeficientes del modelo generado para la Señal ruido, desviación estándar (S), coeficientes de correlación, el análisis de varianza y finalmente los valores de la Señal ruido (más grande mejor):

Tabla 12
Coeficientes de modelos estimados para relaciones señal /ruido

Término	Coef	EE del coef.	T	P
Constante	39.7128	0.01645	2413.446	0.000
[Coloran 10	-0.0067	0.02327	-0.289	0.800
[Coloran 15	0.0831	0.02327	3.569	0.070
[H2O2], 10	-0.0252	0.02327	-1.082	0.392
[H2O2], 30	0.1832	0.02327	7.871	0.016
pH inici 3	0.2132	0.02327	9.161	0.012
pH inici 6	-0.0320	0.02327	-1.376	0.303

Fuente: Minitab 18.

Tabla 13
Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)
0.0494	98.94%	95.75%

Fuente: Minitab 18.

Tabla 14
Análisis de varianza de relaciones señal/ruido

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Varianza	Valor F	Valor P
[Colorante], ppm	2	0.038308	0.019154	7.86	0.113
[H2O2], %W/W	2	0.177435	0.088717	36.41	0.027
pH inicial	2	0.237876	0.118938	48.81	0.020
Error residual	2	0.004874	0.002437		
Total	8	0.458493			

Fuente: Minitab 18.

Tabla 15
Respuesta para relaciones de señal/ruido

Nivel	[Colorante] ppm	[H2O2] %W/W	pH inicial
1	39.71	39.69	39.93
2	39.80	39.90	39.68
3	39.64	39.55	39.53
Delta	0.16	0.34	0.39
Clasificar	3	2	1

Fuente: Minitab 18.

Finalmente, con el análisis de la Medias, la gráfica de efectos principales, los valores de la Señal Ruido para cada factor con sus niveles y la gráfica de efectos principales para dicho estadístico, se determinan las condiciones óptimas del proceso.

5.2.4. Análisis del modelo lineal general de Taguchi

El método de Taguchi brinda un modelo lineal; éste se genera tomando en cuenta la Media de la variable respuesta y relación Señal/Ruido (SN).

Tabla 16
Coefficientes del modelo lineal de Taguchi

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	102.92	3.51	29.36	0.000	
Colorante	-0.077	0.180	-0.43	0.685	1.00
H ₂ O ₂	-0.0363	0.0450	-0.81	0.456	1.00
pH	-0.614	0.256	-2.39	0.062	1.00

Fuente: Minitab 18.

Tabla 17
Resumen del modelo lineal general de Taguchi

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)
0.526783	99.01%	96.05%	11.2387	80.01%

Fuente: Minitab 18.

Finalmente, la **Ecuación de Regresión**, generada de la Tabla 17:

$$\begin{aligned} \text{\%Reducción} \\ \text{de colorante} \\ \text{textil} &= 102.92 - 0.077 [\text{Colorante}] - 0.0363 [\text{H}_2\text{O}_2] - 0.614 \text{ pH inicial} \end{aligned}$$

5.3. Otro tipo de resultados estadísticos, de acuerdo con la naturaleza del problema y la hipótesis

5.3.1. Verificación de los parámetros óptimos del proceso a través de la confirmación experimental

Una vez determinada las condiciones óptimas al utilizar la metodología estadística de Taguchi, se llevó a cabo la confirmación experimental para confirmar esta condición y contrastar los resultados experimentales con el resultado pronosticado por el modelo lineal de Taguchi.

Tabla 18

Resultados de confirmación experimental en condiciones óptimas

% Reducción de color pronosticado	% Reducción de color experimental	Promedio experimental	Error porcentual
98.834	97.82	97.91	0.094
	98.01		
	97.90		



Figura 49. Prueba de confirmación de experimentos en condiciones óptimas.

5.3.2. Prueba t de una muestra

En base a los valores experimentales obtenidos en la confirmación experimental y siendo contrastados con el resultado del modelo lineal, mediante la prueba t verificaremos de forma estadística la hipótesis general con el p-valor.

Tabla 19

Estadísticas descriptivas de la prueba t de una muestra

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
3	97.9100	0.0954	0.0551	(97.6730; 98.1470)

Fuente: Minitab 18.

La prueba de hipótesis, donde μ es la media del % de reducción de color

Hipótesis nula H_0 : “Utilizando un proceso de oxidación avanzada **no** se reducirá el colorante textil directo en una solución modelo”
($\mu = 100$)

Hipótesis alterna H_1 : “Utilizando un proceso de oxidación avanzada se reducirá el colorante textil directo en una solución modelo”
($\mu \neq 100$)

Tabla 20

Prueba t

Valor T	Valor p
-37.95	0.001

Fuente: Minitab 18.

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contratación y demostración de las hipótesis con los resultados

6.1.1. Concentración de colorante textil – Reducción de colorante textil directo (%)

El ANOVA aplicado muestra un valor p considerable, que conduce a aceptar la H_0 : La concentración de colorante textil de 10 ppm no logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada. De forma experimental, se logró el 100 % de reducción del colorante textil directo para una concentración de colorante de 20 ppm., mientras que el método de Taguchi indica que, a una concentración de colorante de 15 ppm, se logra optimizar el proceso de decoloración de la solución modelo, logrando 97.68% de reducción de color.

6.1.2. Concentración de peróxido de hidrógeno – Reducción de colorante textil directo (%)

El ANOVA aplicado muestra un valor p prácticamente nulo que conduce a rechazar la H_0 : La concentración de peróxido de hidrógeno de 30%W/W no logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada. De forma experimental, se logró el 100 % de reducción del colorante textil directo para una dosis de peróxido del 30%W/W., mientras que el método de Taguchi indica que, a una dosis de peróxido del 30 %W/W, se logra optimizar el proceso de decoloración de la solución modelo en 98.81 %. A 10%W/W y a 50%W/W, se obtienen 96.49% y 95.04% de reducción de color respectivamente; esto se debe a que, al aumentar la concentración de peróxido de hidrógeno por encima de la dosis óptima, las moléculas de peróxido empiezan a reaccionar entre ellas mismas, generándose reacciones no deseadas. De esta forma, el porcentaje de reducción de colorante textil disminuye.

6.1.3. pH inicial – Reducción del colorante textil directo (%)

El ANOVA aplicado muestra un valor p prácticamente nulo que conduce a rechazar la H_0 : El pH inicial de 3 no logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada; ya que de forma experimental se logró el 100 % de reducción del colorante textil directo a un pH inicial de 3, mientras que el método de Taguchi indica que, a un pH inicial de 3, se logra optimizar el proceso de decoloración de la solución modelo en 99.15%. Esto se debe a que en medios neutros o básicos el peróxido de hidrógeno se descompone en agua y oxígeno gaseoso, en lugar de producir radicales hidroxilo, cuya concentración disminuye, generando de esta manera una menor decoloración.

6.1.4. Relación de variables independientes sobre la variable dependiente

El análisis de regresión lineal de los valores de reducción del colorante textil directo en una solución modelo expresado como porcentaje muestran que es posible explicar el comportamiento de la reducción del colorante textil directo con la concentración de colorante textil, concentración de peróxido de hidrógeno y pH inicial:

$$\begin{aligned} \text{\%Reducción} \\ \text{de colorante} \\ \text{textil} \end{aligned} = 102.92 - 0.077 [\text{Colorante}] - 0.0363 [\text{H}_2\text{O}_2] - 0.614 \text{ pH inicial}$$

6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares.

Con respecto a la hipótesis específica 1: La concentración de colorante textil de 10 ppm logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada; los resultados obtenidos difieren de los obtenidos por Aleboyeh (2003), Amin (2008) y Castro y Duran (2013); quienes afirman que la decoloración aumenta mientras más bajas sean las concentraciones de colorante.

Con respecto a la hipótesis específica 2: La concentración de peróxido de hidrógeno de 30 %W/W logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada; tomando en cuenta que, de los tres niveles experimentados, la concentración que generó el mayor porcentaje de reducción de color fue la del nivel intermedio ,30%W/W. Esta afirmación coincide con Aleboyeh (2003), Amin (2008) y Castro y Duran (2013), quienes señalan que el porcentaje de decoloración se incrementa hasta un valor máximo y luego a medida que la concentración de peróxido aumenta, la decoloración comienza a disminuir.

Respecto a la hipótesis específica 3: El pH inicial de 3 logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada; los resultados obtenidos coinciden con Aleboyeh (2003) que encontró mejoras de la decoloración en pH neutro con tendencia a ácido, y Castro-Peña (2013) que afirma que logró mayor eficiencia a pH 2.

Con respecto a la hipótesis general, se ha comprobado que utilizando un proceso de oxidación avanzada se reduce el colorante textil directo en una solución modelo; esta afirmación guarda relación con lo expuesto por Aleboyeh (2003), Amin (2008) y Castro y Duran (2013) quienes señalan que el proceso de oxidación avanzada UV/H₂O₂ brinda un buen desempeño en la decoloración de colorantes textiles en soluciones acuosas alcanzando porcentajes de reducción de color de hasta 100%.

6.3. Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigentes.

Las autoras declaran pleno conocimiento de los reglamentos y procedimientos vigentes establecidos por la Universidad Nacional del Callao y se responsabilizan por la información emitida en la presente tesis titulada: “Reducción de colorante textil directo a partir de una solución modelo mediante el uso de un proceso de oxidación avanzada” para optar el título profesional de Ingeniero Químico; la cual se desarrolló verificando el cumplimiento de los aspectos éticos, metodológicos, administrativos, legales y de propiedad intelectual, sometiéndonos a ser sancionadas si se ha actuado en contra de lo establecido.

CONCLUSIONES

1. El proceso de oxidación avanzada H_2O_2/UV es altamente efectivo logrando un porcentaje superior al 99% de reducción de coloración en soluciones acuosas de colorante textil de una solución modelo.
2. La reducción de color se hace más eficaz al llevar el pH a un medio ácido, la concentración de peróxido de hidrógeno incrementa la decoloración hasta un valor dado, posteriormente al seguir aumentando dicha concentración, la decoloración disminuye.
3. Del análisis estadístico de Taguchi se determinó que la mejor combinación de parámetros que maximiza el porcentaje de reducción de colorante es: concentración de colorante 15 ppm, concentración de peróxido de hidrógeno 30% W/W y pH inicial 3. Además, de todos los factores estudiados, el que presenta un mayor efecto en la variable respuesta es el pH inicial con un porcentaje de contribución del 52 %, seguido de la concentración del peróxido de hidrógeno que aporta un 38,7 % y por último la concentración de colorante textil en la solución modelo con un 8%.
4. De la comparación efectuada entre el valor óptimo experimental y el valor pronosticado por el modelo estadístico se determinó que existe una muy buena consistencia entre dichos valores, confirmando de esta manera la efectividad del diseño experimental.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar estudios posteriores con otros parámetros operacionales como caudal, intensidad de la radiación UV, entre otros para ver la influencia con respecto a la decoloración.
2. Se recomienda estudiar la cinética de la reacción de decoloración y realizar análisis posteriores al tratamiento con el fin de identificar reacciones con peróxido de hidrógeno remanente en las muestras tratadas.
3. Se recomienda especial cuidado y limpieza adecuada al momento de manipular la celda de cuarzo en los análisis espectrofotométricos, a fin de evitar errores en la medición de Absorbancias de las muestras.
4. Se recomienda utilizar efluentes textiles reales para darle una orientación más práctica a la realidad y realizar un estudio de escalamiento piloto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGQ Labs Chile S.A. (2017). Análisis químico , medir es comparar.
- Aleboye, A., Aleboye, H., & Moussa, Y. (2003). The study of the effect of different variable on H₂O₂/UV decolorization of three azo dyes in the continous circulation photoreactor. *Transactions on Ecology and the Environment*, 369-378.
- Almecija, M., Hontoria, E., Muñoz, M., Osorio, F., Poyatos, J., & Torres, J. (2010). Advanced Oxidation Processes for wastewater treatment : State of the Art. *Water Air Soil Pollution*.
- Amin, H., Amer, A., El Fecky, A., & Ibrahim, I. (2008). *Treatment of textile waste water using H₂O₂/UV system*. Alexandria: Alexandria University. Obtenido de <https://pdfs.semanticscholar.org/8706/cd6494f42cf06662f8361b24826630e4f716.pdf>
- Barrios, L., Gaviria, L., Agudelo, E., & Cardona, S. (2015). *Tecnologías para la remoción de colorantes y pigmentos presentes en aguas. Una revisión*. Medellín.
- Bes Monge, S., Silva, A., & Bengoa, C. (s.f.). *Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales*. Red Tritón 316RT0506 - Programa CYTED.
- Castro Peña, L., & Durán Herrera, E. (2013). Degradación y decoloración de agua contaminada con colorantes textiles mediante procesos de oxidación avanzada. *Tecnología en Marcha*, 41- 42. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4835431.pdf>
- Cortazar, A., Coronel, C., Escalante, A., & González, C. (2018). *Contaminación generada por colorantes de la industria textil*. Hidalgo, México: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Diario El Telégrafo - Ecuador. (Setiembre de 2009). *Industria del jean afecta al río Patate*. Obtenido de http://www.ecuadorinmediato.com/index.php?module=Noticias&func=news_user_view&id=112725
- Díaz, A. C. (2002). *Fundamentos de Química analítica. Equilibrio iónico y análisis químico*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- ECURED. (8 de Mayo de 2018). *Blog de la enciclopedia colaborativa cubana*. Obtenido de https://www.ecured.cu/EcuRed:Enciclopedia_cubana
- FAO. (1997). Obtenido de Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía. (Boletín de Suelos de la FAO - 68):

<http://www.fao.org/3/T0848S/t0848s06.htm#m%C3%A9todos%20volum%C3%A9tricos>

- Gönder, Z., Kaya, Y., Vergili, I., & Barlas, H. (2010). Optimization of filtration conditions for CIP wastewater treatment by nanofiltration process using Taguchi approach. *Separation and Purification Technology*, 265-273.
- Government of China. (2015). *China Statistical Yearbook 2015*. Obtenido de <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2015/indexeh.htm>
- Gutierrez, H., & De la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. México D.F: Mc Graw Hill.
- Gutierrez, R., Brañez, M., Pérez, R., Uribe, C., & Valle, P. (2018). *Contaminación de los ambientes acuáticos generados por la industria textil*. Lima: Escuela Universitaria de Posgrado UNFV , Maestría en Gestión ambiental.
- Hassan, M., El Nemr, A., & Madkour, F. (2017). Advanced oxidation processes of Mordant Violet 40 dye in freshwater and seawater. *Egyptian Journal of Aquatic Research*.
- Hernández, R. (2014). *Metodología de la Investigación*. México D.F: Mc Graw Hill Education.
- Hossain, L., Kanti Sarker, S., & Samad Khan, M. (2018). *Evaluation of present and future wastewater impacts of textile dyeing industries in Bangladesh- Environmental Development*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2018.03.005>
- Kim, S., & Vogelpohl, A. (2004). Advanced Oxidation Processes (AOPs) in wastewater. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*.
- López, V., & Crespi, M. (Setiembre de 2015). *Gestión de los efluentes de la industria textil*. Recuperado el 8 de Mayo de 2018, de <https://www.inti.gob.ar/ue/pdf/publicaciones/cuadernillo18.pdf>
- Medina, J. (2009). *Desarrollo de módulos de electrodiálisis para la desalinización de aguas salobres, determinación de parámetros físicos y evaluación experimental del modelo difusional*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Obtenido de http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1066/1/medina_cj.pdf
- Minitab 19. (25 de Marzo de 2020). *Soporte de Minitab 19*. Obtenido de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/basics/replicates-and-repeats-in-designed-experiments/>

- Mohammadi, T., & Ali Safavi, M. (2009). Application of Taguchi method in optimization of desalination by vacuum membrane distillation. *Desalination*, 83-89.
- Mohammadi, T., Moheb, A., Sadrzadeh, M., & Razmi, A. (2005). Modeling of metal ion removal from wastewater by electro dialysis. *Separation and Purification Technology*, 73-82.
- Murillo, R. (2010). *Caracterización de las aguas residuales de lavado del banano en Honduras. Aplicación de técnicas de oxidación avanzada para su depuración*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza. Obtenido de https://www.fundacionaquae.org/sites/default/files/caracterizacion_de_la_s_aguas_residuales_de_lavado_0.pdf
- National Center for Biotechnology Information. (8 de Mayo de 2018). *Open chemistry data base*. Obtenido de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5359662#section=Top>
- OEFA. (Abril de 2014). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*. Recuperado el 8 de Mayo de 2018, de https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827
- Osorio, F., Torres, J., & Sánchez, M. (2010). *Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes. Aplicación de procesos industriales a la reutilización de aguas residuales*. Madrid: Díaz de Santos. Obtenido de <https://books.google.com.pe/books?id=ukWBiJ8V1yEC&printsec=frontcover&dq=Tratamiento+de+aguas+para+la+eliminaci%C3%B3n+de+microorganismos+y+agentes+contaminantes.+Aplicaci%C3%B3n+de+procesos+industriales+a+la+reutilizaci%C3%B3n+de+aguas+residuales.&hl=es&>
- Peruano, E. (Julio de 2018). Ley N° 30806. *Ley que modifica diversos artículos de la ley 28303, ley Marco de Ciencia , tecnología y innovación tecnológica; y de la ley 28613 , ley del consejo nacional de ciencia , tecnología e innovación tecnológica (Concytec)*.
- Pickering. (1980). *Química Analítica Moderna*. REVERTÉ S.A.
- Pinedo, A., & Anaya, F. (2017). Estudio de la decoloración del colorante sunfix yellow S4GL empleando el proceso de oxidación avanzada H₂O₂/UV. *Tecnia*.
- Pino Pérez, P. B. (1983). *Análisis de elementos-traza por espectrofotometría de absorción molecular UV-Visible*. Cordoba, Sevilla.: Publicaciones de la Universidad de Sevilla y Monte de Piedad y Caja de ahorros de Cordoba.

- Rodriguez, T., Botelho, D., & Cleto, E. (2008). *Tratamiento de efluentes industriales de naturaleza recalcitrante usando ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta*. Antioquía: Universidad de Antioquía. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n46/n46a03.pdf>
- Salas, J. (2017). *Degradación de colorantes en efluentes provenientes de industrias textiles usando proceso de oxidación avanzada*. Arequipa.
- Sedlak, D. (Julio de 2013). *Afirm group*. Recuperado el 12 de Mayo de 2018, de <http://www.afirm-group.com/wp-content/uploads/2013/07/Apendice-F-Manual-de-Guia-Quimica.pdf>
- Terán, G., Posligua, P., & Banchón, C. (2015). Dosificación mínima del reactivo Fenton para la remediación de agua contaminada con colorantes. *Enfoque UTE*, 66. Obtenido de <http://oaji.net/articles/2015/1783-1443125930.pdf>
- Tinoco, Ó., Medina, A., & Zapata, H. (2011). Tratamiento de efluentes textiles con luz ultravioleta solar. *Industrial Data*.
- UNESCO. (2017). *Aguas residuales, el recurso desaprovechado*. París. Obtenido de <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/04/Informe-Mundial-de-las-Naciones-Unidas-sobre-el-Desarrollo-de-los-Recursos-Hidricos-2017.pdf>
- Urkiaga, A., Gomez, L., Gutierrez, M., & De Las Fuentes, L. (2018). *Aplicación de procesos de oxidación avanzada al tratamiento de efluentes de diferentes sectores industriales*. Zamudio: Centro Tecnológico GAIKER. Obtenido de <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/industriales.pdf>

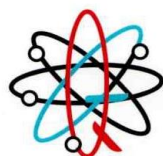
ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

Título: "REDUCCION DE COLORANTE TEXTIL DIRECTO EN UNA SOLUCION MODELO UTILIZANDO UN PROCESO DE OXIDACION AVANZADA"

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES DEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADOR
¿Cuál es el efecto del uso de un proceso de oxidación avanzada en la reducción de colorante textil directo en una solución modelo?	Determinar la eficacia del proceso de oxidación avanzada para reducir el colorante textil directo en una solución modelo.	Utilizando un proceso de oxidación avanzada se reducirá el colorante textil directo en una solución modelo.	Y = Reducción del colorante textil directo.	Absorbancia del colorante textil directo en una solución modelo.	$\%R = \frac{(A_0 - A_f)}{A_0} \times 100$
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES INDEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADOR
¿Cuál es la concentración de colorante textil que logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada?	Determinar la concentración de colorante textil que logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada.	La concentración de colorante textil de 10 ppm logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada.	X ₁ = Concentración de colorante textil.	ppm	X ₁₁ = 10 X ₁₂ = 15 X ₁₃ = 20
¿Cuál es la concentración de peróxido de hidrógeno que logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada?	Determinar la concentración de peróxido de hidrógeno que logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada.	La concentración de peróxido de hidrógeno de 30% WW logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada.	X ₂ = Concentración de peróxido de hidrógeno.	%WW	X ₂₁ = 10% X ₂₂ = 30% X ₂₃ = 50%
¿Cuál es el pH inicial que logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada?	Determinar el pH inicial que logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada.	El pH inicial de 3 logrará la mayor reducción de colorante textil directo en una solución modelo utilizando un proceso de oxidación avanzada.	X ₃ = pH inicial	pH _o	X ₃₁ = 3 X ₃₂ = 6 X ₃₃ = 10

Anexo 2. Certificado de calidad y ficha técnica del peróxido de hidrógeno



QUIMICOS GOICOCHEA S.A.C.
PRODUCTOS QUIMICOS

CERTIFICADO DE CALIDAD

PRODUCTO : PEROXIDO DE HIDROGENO 50%
LOTE : 20190518
FECHA DE PRODUCCION : MAYO 2019
FECHA DE VENCIMIENTO : MAYO 2020

RESULTADOS DE ANALISIS :

PARÁMETROS	ESPECIFICACION	RESULTADOS
Pureza (%)	50.0 mín.	50.30
Estabilidad (%)	99.0 mín.	99.80
Residuos Evaporacion (ppm)	1000 máx.	910.0
Acidez Libre (ppm)	500 máx.	215.0
pH (20°C)	2.0 máx.	1.1
Gravedad Especifica (g/ ml)	---	1.197

*Certificamos que los datos corresponden al Certificado analítico recibido de nuestro Proveedor.

*Esta información no libera al cliente de hacer su propio control una vez recibida la mercadería.

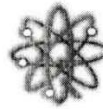

QUIMICOS GOICOCHEA S.A.C.
Marcos M. Zavaleta Rojas
CONTROL DE CALIDAD

5000799 OC 768

FECHA: 19/07/2019

Oficina Principal: Av. Coronel Néstor Gambetta N° 150 Urb. Industrial La Chalaca - Callao - Prov. Const. del Callao
Sucursales: Calle Víctor F. Lira N° 107 Parque Industrial Arequipa - Arequipa - Arequipa
Mz G - Sub lote 6 B - Urb. Parque Industrial La Esperanza - Trujillo - Perú
Central de Ventas 01-614 4400 RPC: 986 631 242
E-mail: qgventas@quimicosgoicochea.com
CALLAO - PERÚ
WEB SITE: www.quimicosgoicochea.com

Ficha Técnica



QUÍMICOS GOICOCHEA S.A.C.
PRODUCTOS QUÍMICOS

PEROXIDO DE HIDROGENO AL 50%

Sinónimos: Agua oxigenada, Dioxidano, Dióxido de hidrogeno.

Fórmula Molecular: H_2O_2

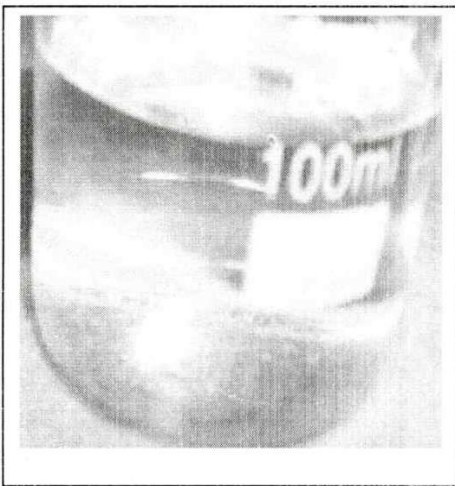
Masa Molecular: 34 gr/mol

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

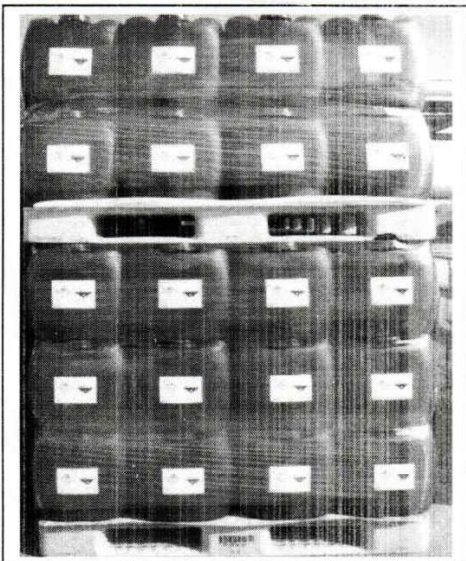
Procedencia: Corea del Sur.

Vida Útil: 1 año a partir de la fecha de producción.

Apariencia: Líquido incoloro.



Presentación: Bidón x 30kg.



INFORMACIÓN TÉCNICA

Composición:

Parámetros	Especificación
Pureza	50.0 % min.
Acido Libre(% como H_2SO_4)	< 0.03 %
Residuo (%)	< 0.05 %
pH aparente	1.0 – 2.0
Estabilidad(% 24 hr a 100 °C)	97 % min.

USOS

Utilizado para la oxidación de minerales sulfurados, para posteriormente ser lixiviados.

Se usa en el blanqueo de la pulpa de papel, de algodón, de telas como un sustituto del hipoclorito, en la potabilización del agua para oxidación de la materia orgánica y en el proceso de elaboración de aceites vegetales y fármacos. Ayuda a eliminar productos como los cianuros, sulfuros, fenoles, encontrados en aguas residuales. Útil en el procesamiento de alimentos para desinfección de los empaques como de las maquinarias utilizadas.

ALMACENAMIENTO Y CONSERVACIÓN

Almacene en un lugar fresco, bien ventilado, seco, y alejado de ácidos, bases, metales, sales de metales, agentes reductores, materiales orgánicos y sustancias inflamables. Mantenga el peróxido de hidrogeno en su contenedor original tanto como sea posible, este nunca debe ser retornado a su envase o tanque original una vez que ha sido removido.

INFORMACIÓN ADICIONAL

Estable bajo condiciones normales de uso con liberación lenta de oxígeno gaseoso. Favorece la combustión con otras sustancias, ya que causa reacciones violentas o explosivas. Altamente corrosivo y oxidante. Se descompone rápidamente con liberación de oxígeno si se contamina con trazas metálicas, sustancias orgánicas y reductoras.

Medidas contra incendios: Utilizar solamente agua, no utilizar espuma, producto químico seco, dióxido de carbono o polvo.

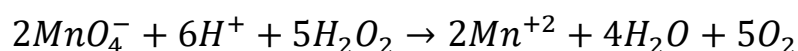
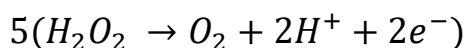
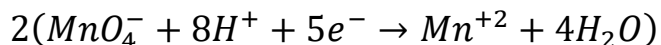
Más Información: www.quimicosgoicochea.com. E-mail: agventas@quimicosgoicochea.com

Oficina Principal: Av. Néstor Gambetta 150 – CALLAO Telf: 614-4400 Fax: 614-4401
RPM: #525791 RPC: 986631242 NEXTEL: 101*4338

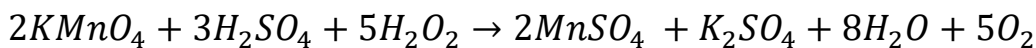
Sucursal: Psje. Morelos Mz. C Lt. 6-7 Urb. María Isabel
AREQUIPA – PERÚ Telf: (054) 213-573 Fax: (054) 202-703 RPM:
#518422 RPC: 972730333 NEXTEL: 144*1603

Anexo 3. Determinación de Peróxido de Hidrógeno mediante valoraciones redox con Permanganometría

En solución ácida el peróxido de hidrógeno reduce el permanganato con formación de O₂.



La ecuación balanceada es la siguiente:



Las primeras gotas de permanganato se decoloran lentamente, pero luego la reacción se hace más rápidamente hasta llegar al punto final.

$$P_{eq\text{H}_2\text{O}_2} = \frac{PM}{\theta} = \frac{34}{2} = 17,0074 \text{ g/eq}$$

$$P_{eq\text{KMnO}_4} = \frac{PM}{\theta} = \frac{158,038}{5} = 31,608 \text{ g/eq}$$

Técnica operatoria:

Se verificará la concentración de peróxido de hidrógeno, para ello se efectuarán los siguientes pasos: (Díaz, 2002)

- Se tomará una alícuota de 25 mL de una muestra de peróxido de hidrógeno y diluirla con agua destilada hasta 200 mL en un matraz volumétrico.

- De la disolución inicial, tomar una alícuota de 20 mL y acidular con H_2SO_4 (1:3), homogenizar con una bagueta.
- Titular en frío con solución de permanganato normalizado, hasta el primer rosa permanente.
- Anotar el volumen de permanganato gastado.

Cálculos:

Hallando el Número de miliequivalentes de Peróxido

$$\#meq - g(H_2O_2) = \#meq - g(KMnO_4)$$

$$= N_{KMnO_4} * V_{KMnO_4}$$

$$= M_{KMnO_4} * \theta_{KMnO_4} * V_{KMnO_4}$$

$$\#meq - g(H_2O_2) = M_{KMnO_4} * 5 * V_{KMnO_4} = X meq - g$$

% de Peróxido en peso-volumen




$$\%H_2O_2 \left(\frac{p}{v} \right) = X meq - g * \frac{34,02gH_2O_2}{2000meq - g} * \frac{200mL}{20mL} * \frac{100mL}{25mL}$$

Anexo 3. Certificado de calibración del espectrofotómetro UV HACH DR 1900



SERVICIOS Y SUMINISTROS PARA LABORATORIO

Certificado de Calibración LMG-107-2019

EXPEDIENTE	E19062429	<p>La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k=2$. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la expresión de la incertidumbre de la medición". Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de confianza de aproximadamente 95%.</p> <p>Los resultados reportados son válidos sólo para el objeto calibrado y corresponden a las condiciones y el momento en que se realizó la calibración. Al solicitante le corresponde definir la frecuencia de calibración de su equipo en función al uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición.</p> <p>Este certificado de calibración sin firmas y sello carece de toda validez alguna.</p>	
SOLICITANTE	INSTITUTO DE EDUCACION AMBIENTAL		
DIRECCIÓN	Cal Pacifico Mza. 29 Lote 9 A.H. Nuevo Lurín, Lurín - Lima.		
EQUIPO	ESPECTROFOTÓMETRO UV		
MARCA	HACH		
MODELO	DR 1900		
NÚMERO DE SERIE	143480001018		
ESCALA DE LONGITUD DE ONDA			
RANGO	340 nm - 800 nm		
EXACTITUD	+/- 2 nm		
ESCALA FOTOMÉTRICA			
RANGO DE MEDIDA FOTOMÉTRICA	-0,3 a 3,0 Abs (340 nm - 800 nm)		
EXACTITUD	0,003Abs (0,0 - 0,5 Abs); 1% (0,50 a 2,0 Abs)		
ANCHO DE BANDA ESPECTRAL	5 nm		
PROCEDENCIA	No indica		
FECHA DE CALIBRACIÓN	2019-08-19		
SELLO	FECHA DE EMISIÓN	GERENTE TÉCNICO	GERENTE DE OPERACIONES
			
	2019-08-20	Alexander Alza Zamudio	Wilmer Mena Chávez

LUGAR DE CALIBRACIÓN

Instalaciones de IEA (Cal Pacifico Mza. 29 Lote 9 A.H. Nuevo Lurin, Lurin)

MÉTODO DE CALIBRACIÓN

Determinación del error de medición del espectrofotómetro, por comparación directa entre el valor medido por el instrumento y el valor de referencia.

MATERIAL DE REFERENCIA CERTIFICADO (MRC) EMPLEADO

Trazabilidad	Material de Referencia Certificado (MRC)	N° Certificado
Starna Cientific Ltd	MRC de Holmio 71791. con incertidumbre de 0,11 nm	68892
Starna Cientific Ltd	MRC de Didymium 70681 con incertidumbre de 0,11 nm	68893
Starna Cientific Ltd	MRC de Densidad Neutra 73198 con incertidumbre de 0 Abs	68905
Starna Cientific Ltd	MRC de Densidad Neutra 73205 con incertidumbre de 0,019 Abs	68905
Starna Cientific Ltd	MRC de Densidad Neutra 73041. con incertidumbre de 0.0052 Abs	68905
Starna Cientific Ltd	MRC de Densidad Neutra 73060. con incertidumbre de 0.0052 Abs	68905

Trazabilidad	Nombre del Patrón	N° de Certificado
Metroil Sac	Termómetro con incertidumbre de 0,17 °C (en 25 °C)	LH-023-2019

CONDICIONES AMBIENTALES REGISTRADAS

	Inicial	Final
Temperatura (°C)	26,1	25,8
Humedad Relativa (%HR)	67	69

RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN
ESCALA DE LONGITUD DE ONDA EVALUADA EN UNIDADES DE NANÓMETROS (nm)

Valor de referencia (Holmio)	Indicación	Error	Incertidumbre	
ABE (nm)	(nm)	(nm)	(nm)	
5	641,7	640	-2	1
5	537,9	536	-2	1
5	485,3	483	-2	1
5	451,4	450	-1	1
5	417,3	415	-2	1
5	386,4	385	-1	1
5	361,1	360	-1	1
5	345,6	344	-2	1

Valor de referencia (Didimio)	Indicación	Error	Incertidumbre	
ABE (nm)	(nm)	(nm)	(nm)	
5	747,6	749	1	1
5	740,5	739	-2	1
5	684,7	683	-2	1
5	585,6	585	-1	1
5	575,1	574	-1	1
5	528,6	527	-2	1
5	513,8	512	-2	1
5	479,9	478	-2	1
5	441,3	440	-1	1

ESCALA FOTOMÉTRICA EVALUADA EN UNIDADES DE ABSORBANCIA (A)						
MRC(Densidad Neutra)		Longitud de Onda λ (nm)				
		$\lambda 1=440.0$	$\lambda 2=485.0$	$\lambda 3=546.1$	$\lambda 4=590.0$	$\lambda 5=635.0$
Absorbancia (A)	Indicación	1,010	0,957	0,992	1,074	1,045
	Valor Ref-1N	1,0258	0,9641	1,0009	1,0824	1,0529
	Error	-0,016	-0,007	-0,009	-0,008	-0,008
	Incertidumbre	0,003				
	Indicación	0,706	0,670	0,693	0,751	0,729
	Valor Ref-2N	0,7093	0,6678	0,6924	0,7569	0,7431
	Error	-0,003	0,002	0,001	-0,006	-0,014
	Incertidumbre	0,006				
	Indicación	0,548	0,512	0,509	0,544	0,552
	Valor Ref-3N	0,5673	0,5277	0,5249	0,5585	0,5659
	Error	-0,019	-0,016	-0,016	-0,015	-0,014
	Incertidumbre	0,019				

OBSERVACIONES :	N° serie de Celda
Densidad Neutra: ref-1N	73205
Densidad Neutra: ref-2N	73041
Densidad Neutra: ref-3N	73060

FIN DE CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Anexo 4. Prueba experimental adicional a 50 ppm de concentración de colorante textil

Se realizó una prueba experimental adicional con las siguientes condiciones:

[Colorante textil] = 50 ppm; [H₂O₂] = 30 % W/W y pH inicial = 3

Nótese que el nivel escogido para la concentración de colorante está por encima de los niveles experimentados.

Los resultados experimentales se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 21

Parámetros inicio-fin para solución modelo con exceso de colorante

Parámetros	Inicio (0 minutos)	Final (180 minutos)
Temperatura (°C)	20	47
Absorbancia (A)	1,117	0,039
pH	3,2	3,1

Con los resultados mostrados y mediante la expresión detallada líneas arriba, calculamos el porcentaje de reducción de color (%R) para esta prueba adicional:

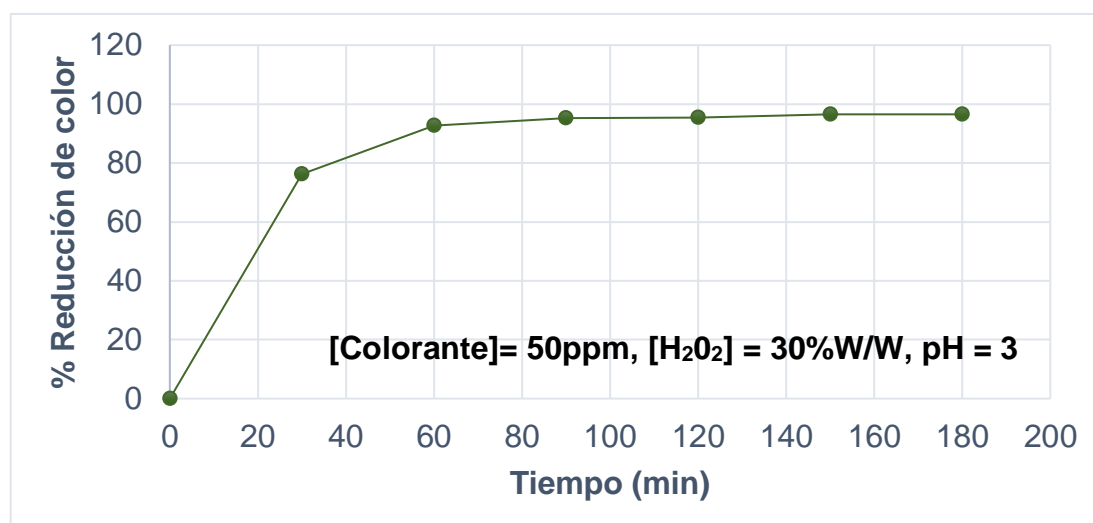


Figura 50. Porcentaje de reducción de color vs tiempo para prueba adicional

$$\% R = \frac{(A_0 - A_f)}{A_0} \times 100 = \frac{(1,117 - 0,039)}{1,117} \times 100 = \mathbf{96,51}$$

El objetivo de efectuar esta corrida adicional fue para verificar la eficacia de los niveles de 30% W/W para la concentración de peróxido de hidrógeno y 3 para el pH inicial.

Se observó un comportamiento muy similar a las corridas contempladas en la matriz experimental de Taguchi (Véase tabla 6), donde la corrida N° 8 de dicha tabla, difiere únicamente en la concentración del colorante textil.

La corrida N° 8 fue la que obtuvo el mayor porcentaje de reducción de color ,100%, (Véase tabla 7), mientras que la corrida adicional llegó al 96,51% de reducción; esto nos indica que la concentración de colorante y el porcentaje de reducción de color son inversamente proporcionales. Esto se debe a que, al haber mayor cantidad de moléculas de colorante en la solución, estas no permiten el paso de la radiación UV necesaria para que se dé la fotólisis del peróxido de hidrógeno, generando así una mínima cantidad de radicales hidroxilos y por ende un menor porcentaje de reducción de color. (Aleboyeh, Aleboyeh, & Moussa, 2003)

Anexo 5. Solicitud de permiso para obtener muestra de efluente textil pretratado.

Lima, 3 de Diciembre de 2019

SOLICITUD DE PERMISO

A la atención del Ingeniero Francisco Manco; solicitamos el ingreso de las tesis:
Norah Vásquez Rosas y Sandra Cano Tacuri para recoger muestras de aguas
residuales con fines académicos, provenientes de TEXTIL EL AMAZONAS S.A, de
antemano estamos agradecidas.



Norah Vásquez Rosas


DNI: 46787026



Sandra Cano Tacuri

DNI: 46563838

TEXTIL EL AMAZONAS S.A.



Francisco Manco Matos
COORDINADOR DE LABORATORIOS
CONTROL DE CALIDAD

Anexo 6. Prueba experimental con efluente residual textil pretratado

Se realizó una prueba experimental con efluente residual pretratado de la planta piloto ubicada en Textil El Amazonas S.A en el Cercado de Lima. Dicha planta piloto cuenta con un tanque de homogenización donde se colectan los efluentes de las diversas etapas del proceso productivo textil; el objetivo del tanque de homogenización es amortiguar y minimizar las variaciones de caudales y concentraciones para mejorar la efectividad de los tratamientos posteriores. El tren de procesos del tratamiento de efluentes de la planta piloto es el siguiente:

1) Tanque de homogenización

2) Tratamiento fisicoquímico

Se divide en dos etapas:

A) Sistema de dosificación de agentes químicos

- Químicos para balancear el pH
- Coagulantes y floculantes específicos
- Sistema floculador de tubos



Figura 51. Sistema floculador de tubos

B) Sistema de flotación por aire disuelto – DAF



Figura 52. Tanque de floculación por aire disuelto (DAF)

3) Tratamiento de Oxidación Avanzada

Se logra reducir la parte soluble de la DBO y otros compuestos orgánicos, así como también se desinfecta el agua.

- Sistema de dosificación de peróxido de hidrógeno
- Generador de ozono



Figura 53. Dosificación de peróxido de hidrógeno y generador de ozono

4) Sistema de Ultrafiltración

Es un proceso de purificación mediante el uso de membranas cuyo objetivo es eliminar pequeñas partículas compuestas por sólidos suspendidos, bacterias, virus, etc; con la finalidad de producir agua con muy baja cantidad de sedimentos.

5) Sistema de Ósmosis Inversa

Técnica de desmineralización basada en membranas de alto grado de rechazo.



Figura 54. Sistema de ultrafiltración y ósmosis inversa

Se muestrearon 15 litros de efluente pretratado a la salida del clarificador.



Figura 55. Muestreo de efluente residual pretratado en planta piloto textilera

Aspecto inicial: Efluente turbio, coloración marrón, ligeramente aceitosa, pH altamente básico.

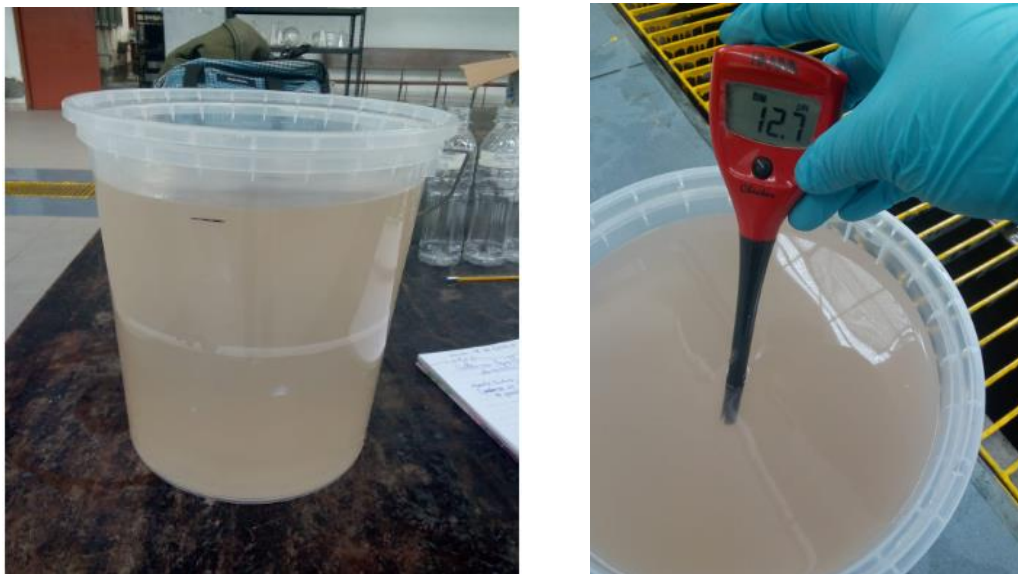


Figura 56. Efluente residual inicial pretratado

Caracterizando el efluente residual pretratado:

Tabla 22
Caracterización de efluente textil pretratado

Absorbancia ($\lambda = 465 \text{ nm}$)	Sólidos Suspendidos Totales (TSS)	pH inicial
1.062	259	12.7

Se llevó a cabo una corrida experimental con los valores óptimos encontrados con el modelo estadístico: Concentración de peróxido de hidrógeno 30% W/W y pH 3.

Se acidificó con ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4 cc)

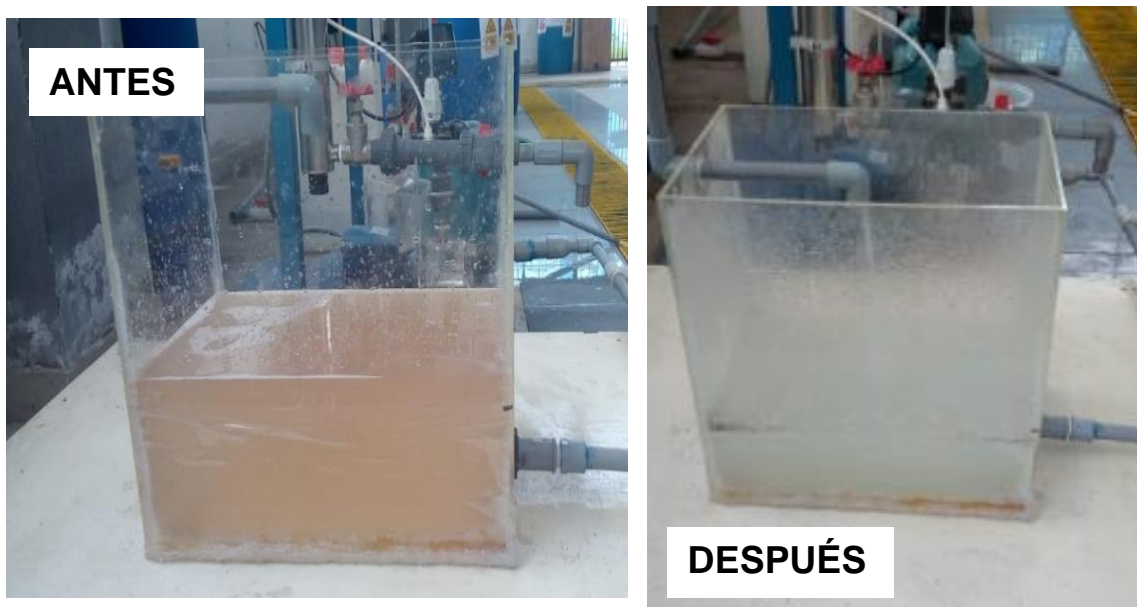


Figura 57. Efluente residual pretratado antes y después de la oxidación avanzada.

A continuación, se muestran los valores monitoreados para 3 horas:

Tabla 23

Absorbancia y TSS en tratamiento de efluente residual pretratado

Tiempo (min)	Absorbancia ($\lambda= 465$ nm)	Sólidos Suspendidos Totales (TSS)
0	1.062	259
30	0.974	252
60	0.914	244
90	0.806	238
120	0.763	234
150	0.757	230
180	0.721	226

Conclusión: Podemos ver la disminución de los valores de absorbancia y TSS al culminar las 3 horas de tratamiento, esto nos indica que tratamiento de oxidación avanzada con H_2O_2/UV es efectivo en un efluente real pretratado.

Para esta experiencia, el porcentaje de reducción de color obtenido, para un efluente real pretratado fue de **32,10%**.

Para elevar la efectividad es necesario efectuar un tratamiento primario (por ejem. coagulación – floculación) ya que, al ser efluente real, contiene muchas otras sustancias propias del proceso productivo que seguirán presentes e interferirán en los tratamientos terciarios, generando nuevas sustancias que enturbian y por consiguiente disminuyen el efecto de la oxidación avanzada.

Estos resultados nos permiten comprender la importancia de los pretratamientos para aprovechar los tratamientos más especializados al máximo.

Anexo 7. Datos recopilados durante el proceso experimental

Tabla 24

Data experimental de la figura 25

Tiempo (min)	%Reducción de color
0	0
30	90.88
60	95.09
90	98.25
120	98.25
150	98.95
180	98.95

Tabla 25

Data experimental de la figura 26

Tiempo (min)	%Reducción de color
0	0
30	87.54
60	98.58
90	98.58
120	98.58
150	98.22
180	98.22

Tabla 26

Data experimental de la figura 27

Tiempo (min)	%Reducción de color
0	0
30	66.46
60	88.62
90	92.62
120	88.62
150	83.08
180	77.54

Tabla 27
Data experimental de la figura 28

Tiempo (min)	%Reducción de color
0	0
30	84.76
60	95.24
90	96.19
120	95.71
150	96.19
180	96.67

Tabla 28
Data experimental de la figura 29

Tiempo (min)	%Reducción de color
0	0
30	90.15
60	95.93
90	97.86
120	97.86
150	97.64
180	97.22

Tabla 29
Data experimental de la figura 30

Tiempo (min)	%Reducción de color
0	0
30	77.45
60	95.96
90	97.23
120	98.51
150	98.51
180	98.51

Tabla 30
Data experimental de la figura 31

Tiempo (min)	%Reducción de color
0	0
30	47.41
60	82.03
90	93
120	93.85
150	93.37
180	93

Tabla 31
Data experimental de la figura 32

Tiempo (min)	%Reducción de color
0	0
30	88.94
60	99.23
90	99.54
120	99.69
150	100
180	100

Tabla 32
Data experimental de la figura 33

Tiempo (min)	%Reducción de color
0	0
30	80.3
60	92.33
90	92.18
120	93.23
150	93.98
180	93.83

Tabla 33
Data experimental de la figura 34

Tiempo (min)	Absorbancia
0	0.829
30	0.436
60	0.149
90	0.058
120	0.051
150	0.055
180	0.058

Tabla 34
Data experimental de la figura 35

Tiempo (min)	pH
0	10
30	9.9
60	9.7
90	9.5
120	9.6
150	9.7
180	9.8

Tabla 35
Data experimental de la figura 36

Tiempo (min)	Temperatura (°C)
0	21
30	30
60	37
90	42
120	44
150	45
180	46

Tabla 36
Data experimental de la figura 37

[H ₂ O ₂]	[Colorante textil]		
	10 ppm	15 ppm	20ppm
10%W/W	98.95	96.67	93.85
30%W/W	98.58	97.86	100
50%W/W	92.62	98.51	93.98

Tabla 37
Data experimental de la figura 38

pH inicial	[Colorante textil]		
	10 ppm	15 ppm	20 ppm
3	98.95	98.51	100
6	98.58	96.67	93.98
10	92.62	97.86	93.85

Tabla 38
Data experimental de la figura 39

[Colorante textil]	[H ₂ O ₂]		
	10 %W/W	30 %W/W	50 %W/W
10 ppm	98.95	98.58	92.62
15 ppm	96.67	97.86	98.51
20 ppm	93.85	100	93.98

Tabla 39
Data experimental de la figura 40

pH inicial	[H ₂ O ₂]		
	10 %W/W	30 %W/W	50 %W/W
3	98.95	100	98.51
6	96.67	98.58	93.98
10	93.85	97.86	92.62

Tabla 40
Data experimental de la figura 41

[H ₂ O ₂]	pH inicial		
	3	6	10
10%W/W	98.95	96.67	93.85
30%W/W	100	98.58	97.86
50%W/W	98.51	93.98	92.62

Tabla 41
Data experimental de la figura 42

[Colorante textil]	pH inicial		
	3	6	10
10 ppm	98.95	98.58	92.62
15 ppm	98.51	96.67	97.86
20 ppm	100	93.98	93.85

Tabla 42
Data experimental de la figura 47, prueba adicional a 50 ppm.

Tiempo (min)	%Reducción de color
0	0
30	76.19
60	92.75
90	95.26
120	95.34
150	96.51
180	96.51