

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

---

---

**DEGRADACION DE LA CARGA ORGANICA EN AGUAS RESIDUALES DE  
UN SALÓN DE BELLEZA MEDIANTE EL POA FOTO-FENTON**

---

---

**Tesis**

**Para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico**

**PRESENTADO POR:**

**RAMOS HUARI, Jannicce Karolay**

**TORRE VITOR, Daniel**

**HUANCAYO - PERU**

**2022**



# ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS VIRTUAL

BACHILLER: **JANNICCE KAROLAY RAMOS HUARI**  
PARA OPTAR EL TITULO DE: **INGENIERA QUÍMICO**

Siendo las once horas del día viernes nueve del mes de diciembre del año dos mil veintidós, mediante la Plataforma Microsoft Teams canal de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Centro del Perú; con la presencia virtual del jurado examinador, conformado por los catedráticos:

**PRESIDENTE** : Dr. CESAR AUGUSTO LOAYZA MORALES  
**SECRETARIA** : Ms. VILMA ROSARIO CALDERÓN FLORES  
**VOCAL (1)** : Dr. ARTURO MISAEL MELGAR MERINO  
**VOCAL (2)** : Dra. JUANA MARÍA MENDOZA SÁNCHEZ  
**VOCAL (3)** : Ms. VIOLETA QUISPE COQUIL  
**VOCAL (suplente)** : Ms. MARCO ANTONIO MEZA PÉREZ PALMA

El presidente, dio inicio al acto de sustentación virtual, invitando a la señora secretaria a dar lectura la **Resolución N° 059-2022-DFIQ-UNCP**. Seguidamente invitó a la Bachiller **JANNICCE KAROLAY RAMOS HUARI** a la sustentación y defensa de su tesis titulada: **"DEGRADACION DE LA CARGA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES DE UN SALÓN DE BELLEZA MEDIANTE EL POA FOTO-FENTON"**. Concluida la sustentación, los señores miembros del jurado procedieron a realizar las preguntas y observaciones del caso, finalmente los miembros del jurado abandonaron la sala virtual de manera momentánea para deliberar. Realizada la votación secreta se tuvo el veredicto: **APROBADA POR UNANIMIDAD** siendo las **13:00** horas, se dio por concluida el acto de sustentación virtual, firmando al pie los presentes.



PRESIDENTE



VOCAL(1)



VOCAL(2)



VOCAL(3)



SECRETARIA DOCENTE



# ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS VIRTUAL

BACHILLER: **DANIEL TORRE VITOR**  
PARA OPTAR EL TITULO DE: **INGENIERO QUÍMICO**

Siendo las once horas del día viernes nueve del mes de diciembre del año dos mil veintidós, mediante la Plataforma Microsoft Teams canal de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Centro del Perú; con la presencia virtual del jurado examinador, conformado por los catedráticos:

**PRESIDENTE** : Dr. CESAR AUGUSTO LOAYZA MORALES  
**SECRETARIA** : Ms. VILMA ROSARIO CALDERÓN FLORES  
**VOCAL (1)** : Dr. ARTURO MISAEL MELGAR MERINO  
**VOCAL (2)** : Dra. JUANA MARÍA MENDOZA SÁNCHEZ  
**VOCAL (3)** : Ms. VIOLETA QUISPE COQUIL  
**VOCAL (suplente)** : Ms. MARCO ANTONIO MEZA PÉREZ PALMA

El presidente, dio inicio al acto de sustentación virtual, invitando a la señora secretaria a dar lectura la **Resolución N° 060-2022-DFIQ-UNCP**. Seguidamente invitó al Bachiller **DANIEL TORRE VITOR** a la sustentación y defensa de su tesis titulada: **"DEGRADACION DE LA CARGA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES DE UN SALÓN DE BELLEZA MEDIANTE EL POA FOTO-FENTON"**. Concluida la sustentación, los señores miembros del jurado procedieron a realizar las preguntas y observaciones del caso, finalmente los miembros del jurado abandonaron la sala virtual de manera momentánea para deliberar. Realizada la votación secreta se tuvo el veredicto: **APROBADO POR UNANIMIDAD** siendo las **13:00** horas, se dio por concluida el acto de sustentación virtual, firmando al pie los presentes.



PRESIDENTE



VOCAL(1)



VOCAL(2)



VOCAL(3)



SECRETARIA DOCENTE

**ORCID ID ASESOR:** 0000-0003-0050-0841

**NOMBRE Y APELLIDOS:** ARTURO MISAEL MELGAR MERINO

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

---

---

**DEGRADACION DE LA CARGA ORGANICA EN AGUAS RESIDUALES DE  
UN SALÓN DE BELLEZA MEDIANTE EL POA FOTO-FENTON**

---

---

**Tesis**

**Para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico**

**PRESENTADO POR:**

**RAMOS HUARI, Jannicce Karolay**

**TORRE VITOR, Daniel**

**HUANCAYO - PERU**

**2022**

## **TÍTULO**

**“Degradación de la carga orgánica en aguas residuales de un salón de belleza  
mediante el POA foto-Fenton”**

**ASESOR**

**ARTURO MISAEL MELGAR MERINO**

## DEDICATORIA

*A Dios quien me brinda amor, bendición, paz y fortaleza en cada etapa de mi vida,*

*Con el mejor afecto para mis padres Elizabeth y Víctor quienes me brindan su amor, paciencia y esfuerzo constante para impulsarme a conseguir mis metas propuestas aun así existan dificultades en el transcurso de la vida.*

*A mis buenos amigos de toda la vida quienes me acompañan desde siempre dándome fuerzas y transmitiéndome las mejores vibras en todo ámbito.*

*Jannicce Karolay*

*A la memoria de Mariela, mi hermana; y el alma que ella dejó, mis sobrinos.*

*A mis padres y tíos, sin quienes yo nada sería*

*A mis hermanos, son el soporte para seguir adelante.*

*A una gran amiga, Ingrit; solo me queda decirle, gracias por tanto.*

*A mis grandes compañeros; Deyvi, Wendy, Raquel.*

*Daniel*

## AGRADECIMIENTOS

*Al Dr. Arturo Misael Melgar Merino, GRACIAS por su tiempo, sus conocimientos y la enseñanza de las mismas. Siempre nos acompañó con ese buen humor, los ánimos; ha sido un gran honor trabajar bajo su dirección.*

*A la Facultad de Ingeniería de Química de la Universidad Nacional del Centro del Perú por la formación profesional que brindan a su plana estudiantil*

*Maribel, GRACIAS por brindarnos ese espacio de tu tiempo y lugar de trabajo, esa confianza y disponibilidad, para poder realizar nuestras corridas experimentales; estaremos eternamente en deuda contigo.*

*Alfonso, no mencionarte sería muy desconsiderado de nuestra parte, tu apoyo ha sido muy importante para finalizar este trabajo, nos salvaste de muchas premuras; GRACIAS por tu disponibilidad completa y desinteresada, sé que a veces fuimos inoportunos.*

*A nuestra familia en general por su aprecio, paciencia y su apoyo durante el proceso académico de la carrera.*

*A nuestros padres, siempre nos acompañan con amor.*

*Finalmente .....*

*!!!!Gracias a todos!!!!*

*Jannicce y Daniel*

## RESUMEN

Ante la necesidad de plantear métodos nuevos de tratamientos o a la acentuación de los ya disponibles para el tratamiento de aguas residuales de las diversas industrias, el presente trabajo de investigación “Degradación de la carga orgánica en aguas residuales de un salón de belleza mediante el POA Foto-Fenton”, se plantea el objetivo de encontrar las condiciones óptimas de los parámetros más importante (pH y cantidad de  $H_2O_2$ ) para la degradación de la carga orgánica en las aguas para el cual se obtuvo muestras en los salones de bellezas ubicadas en el distrito de Huancayo y El Tambo; con todas las muestras obtenidas se elaboró una mezcla homogénea haciendo un total de 32 litros. Una porción fue tomada para el envío para análisis a SGS del Perú (laboratorio de ensayo certificado) y con la otra se realizó el desarrollo experimental. En ese sentido, para el desarrollo experimental se utilizó un reactor tubular acero inoxidable de un largo de 25 cm y 1.5 cm de diámetro con capacidad de 1.2 litros, en cuyo interior tiene una lámpara UV de 16 watts y una radiación monocromática de 254 nm conectado a una bomba para asegurar la circulación y la mezcla. Las variables independientes de la investigación fueron el pH: 3 y 5, y la cantidad de  $H_2O_2$ : 50 %, 70 % y 100 % del requerido estequiométricamente para el tratamiento foto-Fenton (2.125 g de  $H_2O_2$ /g de DQO); para todos los casos se mantuvo se mantuvo la relación  $H_2O_2/Fe^{2+}$  de 10/0.5 (por cada 10 gramos de oxidante 0.5 gramos de catalizador). Adicionalmente se realizó un tratamiento sin manipular pH para ver el comportamiento de la misma en función del tiempo, donde se observó que a medida que el tratamiento avanzaba el medio se acidificaba debido a la formación de iones de hidrógeno ( $H^+$ ). Para análisis del DQO se determina por lo descrito en “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”. Los resultados obtenidos después de un análisis ANOVA indican el pH y la cantidad de  $H_2O_2$  influyen en la remoción de DQO; para encontrar las mejores se realizó las comparaciones mediante el método Tukey, siendo las mejores condiciones a pH 3 con 50 %, 70 % y 100 % del  $H_2O_2$ , donde se obtuvo de DQO remociones mayores a 92.5 %.

## ABSTRACT

In view of the need to propose new treatment methods or the accentuation of those already available for the treatment of wastewater from various industries, this research work "Degradation of the organic load in wastewater from a beauty salon using the POA Photo-Fenton", aims to find the optimal parameters (pH and amount of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) for the degradation of the organic load in the water for which samples were obtained in the beauty salons located in the district of Huancayo and El Tambo; A homogeneous mixture was prepared with all the samples obtained, making a total of 32 liters. One portion was taken to be sent for analysis to SGS del Perú (certified testing laboratory) and the other portion was used for the experimental development. In this sense, for the experimental development a stainless steel tubular reactor of 25 cm long and 1.5 cm in diameter with a capacity of 1.2 liters was used, inside which there is a 16 watt UV lamp and a monochromatic radiation of 254 nm connected to a pump to ensure the circulation and the mixture. The independent variables of the investigation were pH: 3 and 5, and the amount of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: 50 %, 70 % and 100 % of the stoichiometric requirement for the photo-Fenton treatment (2.125 g H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/g COD); for all cases the H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>2+</sup> ratio of 10/0.5 was maintained (for every 10 grams of oxidant 0.5 grams of catalyst). Additionally, a treatment was carried out without manipulating pH to see the behavior of the same as a function of time, where it was observed that as the treatment progressed the medium acidified due to the formation of hydrogen ions (H<sup>+</sup>). For COD analysis, it is determined as described in "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". The results obtained after an ANOVA analysis indicate that pH and the amount of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> influence COD removal; to find the best ones, comparisons were made using the Tukey method, the best conditions being at pH 3 with 50 %, 70 % and 100 % of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, where COD removals higher than 92.5 % were obtained.

## INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de los salones de belleza cada vez se acentúa más en el Perú, a su vez la generación de productos de belleza como tintes, decolorantes, tratamientos químicos y entre otros. Estos productos contienen sustancias químicas recalcitrantes principalmente compuestos derivados del petróleo, peróxido de hidrógeno, tintes, disolventes, y permanentes para el cabello a base de amoníaco, según lo aluden Castillo Cortés et al., (2012). Actualmente las descargas de este tipo de agua en su mayoría son vertidas en el alcantarillado sanitario, por ende, desembocan en los cuerpos de agua naturales, lo que resulta una problemática ambiental debido a los productos de degradación que podrían ser tóxicos amenazando a la vida acuática, y flora, además de los seres humanos.

En el Perú, existe un limitado conocimiento para realizar el tratamiento de estas aguas residuales procedentes de los salones de belleza; por su composición misma; además que considerándose como tipo de agua residual domestica no está supeditado a alguna normativa ambiental, no obstante, debido al impacto ambiental que actualmente generan, estas deberían desembocar en tanques sépticos o realizarse un Pretratamiento. Por lo tanto, con la finalidad de preservar la integridad ambiental, es primordial que las entidades reguladoras deban monitorear así también la calidad de los efluentes de los salones de belleza, verificando que los parámetros fisicoquímicos se encuentren conforme la normativa de los Valores Máximos Admisibles (VMA).

Ante esta problemática ambiental, el Proceso de Oxidación Avanzada (POA) se proyecta como una solución tentativa, debido que en su proceso genera especies fuertemente oxidantes (Radicales Hidroxilo  $\text{OH}^{\bullet}$ ) a fin de degradar la materia orgánica contaminante. Con el interés de generar más radicales hidroxilos en este proceso se origina nuevos métodos como: Ozono, Ozono/UV, Fenton, Foto Fenton; siendo el proceso foto-Fenton considerado como uno de los más eficaz y relativamente de bajo costo en relación a los otros métodos de tratamiento en el mercado, como lo refieren Bauer & Fallmann (1997).

Los resultados en la presente investigación del tratamiento foto-Fenton de la mezcla de las aguas provenientes de los diferentes salones de belleza situados en la

ciudad de Huancayo, que básicamente en su composición se cuenta con la presencia de componentes recalcitrantes en elevadas concentraciones. La disyuntiva en este experimento es considerar la dosis adecuada de los reactivos: peróxido y catalizador. En ese sentido el análisis estadístico, a fin de realizar la interacción de variables y los niveles nos conlleva al óptimo proceso del tratamiento de estas aguas residuales.

El presente informe consta de la parte introductoria y de 3 capítulos; en el capítulo I desarrolla la revisión bibliográfica donde se da a conocer los antecedentes de la investigación, fundamentos teóricos y las conceptualizaciones de algunos términos claves; se continúa con el capítulo 2 que describe la parte experimental a detalle y el capítulo 3 presenta los resultados y las discusiones respectivas. finalmente se presentan las conclusiones, recomendaciones, referencia bibliográfica y los anexos.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Encontrar las condiciones óptimas de los parámetros operacionales para la degradación de la carga orgánica en las aguas residuales de salón de belleza mediante el POA foto-Fenton.

### **Objetivos Específicos**

- Caracterizar fisicoquímica y microbiológicamente las aguas residuales de salones de belleza.
- Determinar la cantidad adecuada de peróxido de hidrógeno para la degradación de la DQO contenido en aguas residuales de un salón de belleza por tratamiento foto-Fenton
- Establecer el pH idóneo para la degradación de la DQO contenido en aguas residuales de un salón de belleza por tratamiento foto-Fenton
- Estimar la degradación de la DQO en las aguas residuales de un salón de belleza luego del tratamiento con foto-Fenton

## SIMBOLOGIA

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDADES
DQO	Demanda Química de Oxígeno	mg/l
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l
A Y G	Aceites y Grasas	mg/l
SST	Solidos Suspendidos Totales	mg/l
pH	Potencial de hidrogeno	Adimensional
V	Volumen	L
Abs	Absorbancia (respuesta de equipo)	Adimensional
a	Pendiente de la curva	Adimensional
b	Punto de intersección de la curva	Adimensional
<i>f</i> Dilución	Factor de dilución	Adimensional
<i>V<sub>muestra</sub></i>	Volumen de la muestra/alícuota	mL
<i>V<sub>final</sub></i>	Volumen final de la dilución de alícuota	mL
% $\left(\frac{p}{p}\right)$	Concentración peso - peso	%
$\rho$	Densidad	g/ml
<i>W</i>	Peso	g
E°	Potencial	V
$\lambda$	Longitud de Onda	nm
k	Constante de cinética de reacción	M/s
<i>V<sub>patron</sub></i>	Volumen de la solución patrón	mL
<i>V<sub>fiola</sub></i>	Volumen de fiola para patrón de curva	mL
<i>DQO<sub>curva</sub></i>	Demanda química de oxígeno para la curva de calibración	mg/L
<i>DQO<sub>Patron</sub></i>	Demanda química de oxígeno de la solución patrón	1000 mg/L

<b><math>DQO_i</math></b>	Demanda química de la muestra antes de tratamiento	mg/L
<b><math>DQO_f</math></b>	Demanda química de la muestra después de tratamiento	mg/L
<b><math>\%DQO_{Removido}</math></b>	Porcentaje de DQO removido	%
<b><math>Masa H_2O_2 (est)</math></b>	Masa del peróxido estequiométrico para tratamiento	g
<b><math>Masa H_2O_2 (necesario)</math></b>	Masa del peróxido necesario para tratamiento	g
<b><math>Volumen H_2O</math></b>	Volumen de agua residual a tratar	L
<b><math>\%(p/p) H_2O_2</math></b>	Concentración de peróxido de hidrógeno	g $H_2O_2$ /g Sol
<b><math>\rho_{H_2O_2}</math></b>	Densidad del peróxido de hidrógeno	g/mL
<b><math>W_{FeSO_4.7H_2O}</math></b>	Masa de sulfato ferroso heptahidratado requerido	g
<b><math>R^2</math></b>	Coefficiente de correlación cuadrado	Adimensional
<b>R</b>	Coefficiente de correlación	Adimensional
<b><math>H_2O_2</math> ESTQ</b>	Peróxido de hidrógeno estequiométrico	g
<b><math>\alpha</math></b>	Nivel de significancia	Adimensional
<b>p</b>	probabilidad de obtener un valor	Adimensional
<b>GL</b>	Grados de libertad	Adimensional
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxígeno	mg/l
<b>DBO</b>	Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l
<b>SST</b>	Sólidos Suspendidos Totales	mg/l
<b>pH</b>	Potencial de hidrógeno	adimensional
<b>A Y G</b>	Aceites y Grasas	mg/l
<b>V</b>	Volumen	L
<b>Abs</b>	Absorbancia	adimensional
<b>a</b>	Pendiente de la curva	adimensional
<b>b</b>	Punto de intersección de la curva	adimensional
<b>f</b>	Factor de dilución	adimensional

$\% \left( \frac{P}{p} \right)$	Concentración peso - peso	%
$\rho$	Densidad	g/ml
$W$	Peso	g
$E^\circ$	Potencial	V
$\lambda$	Longitud de Onda	nm

## ABREVIATURAS

CIU	Clasificación Industrial Uniforme
PPD	Parafenilendiamina
PAO	Proceso de Oxidación Avanzada
VMA	Valores Máximo Admisible
COT	Carbono orgánico total
UV	Ultra violeta
OEFA	Organismo de Evaluación de Fiscalización Ambiental

## INDICE DE CONTENIDOS

TÍTULO .....	ii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTOS .....	v
RESUMEN .....	vi
ABSTRACT.....	vii
INTRODUCCIÓN.....	viii
OBJETIVOS .....	x
Objetivo General.....	x
Objetivos Específicos .....	x
ABREVIATURAS.....	xiv
INDICE DE CONTENIDOS .....	xv
INDICE DE TABLAS .....	xix
INDICE DE FIGURAS .....	xxi
1. CAPITULO I.....	22
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	22
1.1. ANTECEDENTES .....	22
1.2. Marco Teórico.....	25
1.2.1. Agua residual.....	25
1.2.2. Salones de bellezas en el Perú.....	26
1.2.3. Aguas residuales de salones de belleza .....	27
1.2.4. Contaminantes comunes del agua residual de un Salón de Belleza 28	
1.2.5. Tratamientos de aguas residuales .....	30
1.2.6. Procesos de oxidación avanzada (POAs) .....	33
1.2.7. Ventajas de los POAs .....	34

1.2.8.	Radical hidroxilo .....	34
1.2.9.	Características fisicoquímicas .....	35
1.2.10.	Proceso Fenton .....	35
1.2.11.	Factores que influyen sobre la reacción de Fenton .....	36
1.2.12.	Selección de la dosis óptima del peróxido de hidrógeno .....	39
1.2.13.	Proceso foto-Fenton .....	40
1.2.14.	Normativa Ambiental para la calidad del agua. ....	41
1.2.15.	Peróxido de hidrogeno .....	42
1.3.	MARCOS CONCEPTUALES .....	43
	CAPITULO II .....	44
	PARTE EXPERIMENTAL .....	44
2.1.	Metodología .....	44
2.1.1.	Materiales .....	44
2.1.2.	Reactivos .....	44
2.1.3.	Equipos .....	45
2.2.	Método .....	47
2.2.1.	Obtención de la muestra .....	47
2.2.2.	Caracterización de las muestras antes de tratamiento .....	47
2.2.3.	Metodología experimental para la determinación de Demanda Química de Oxígeno (DQO) .....	47
2.2.4.	Preparación de la curva de calibración .....	48
2.2.5.	Procedimiento de análisis de muestras .....	49
2.2.6.	Metodología experimental de foto-Fenton .....	51
2.2.7.	Filtración .....	51
2.2.8.	Volumen de peróxido de hidrogeno requerido .....	52

2.2.9.	Cálculo de sulfato ferroso heptahidratado necesario para cada experimento	53
2.2.10.	Cálculo de porcentaje de DQO removido .....	54
2.2.11.	Diseño de investigación .....	54
3.	CAPITULO III .....	56
	TRATAMIENTO DE DATOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	56
3.1.	Tratamiento de datos.....	56
3.1.1.	Reactivos utilizados.....	56
3.1.2.	Características fisicoquímicas y microbiológicas de las aguas residuales de los salones de belleza.....	57
3.1.3.	Requerimiento teórico de peróxido de hidrógeno .....	57
3.1.4.	Masa de Fe <sup>+2</sup> requerido .....	57
3.1.5.	Condiciones de experimentos de las variables independientes .....	58
3.1.6.	Curva de calibración del DQO .....	58
3.1.7.	Demanda Química de Oxígeno de los residuos líquidos de los salones de belleza .....	59
3.1.8.	Determinación de las condiciones óptimas para el tratamiento de aguas residuales, mediante el tratamiento foto-Fenton .....	60
3.1.9.	Porcentaje de reducción del DQO mediante el tratamiento foto-Fenton	61
3.2.	Discusión de resultados .....	61
3.2.1.	Caracterización fisicoquímica de las muestras.....	61
3.2.2.	Evaluación de la influencia del pH en la remoción de DQO .....	62
3.2.3.	Evaluación de la influencia de la cantidad de peróxido de hidrógeno en la remoción de DQO .....	63
3.2.5.	Contrastación de hipótesis.....	65
	CONCLUSIONES .....	72

RECOMENDACIONES.....	73
REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍAS .....	74
ANEXOS .....	78
Anexo 1.....	79
Certificado de análisis fisicoquímicos.....	79
Anexo 2.....	83
Ejemplos de cálculos .....	83
Anexo 3.....	85
Validación de curva de calibración .....	85
Anexo 4.....	87
Equipos y materiales.....	87

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1 PARÁMETROS DE AGUAS RESIDUALES Y LODOS DE LOS SALONES DE BELLEZA DE NUEVA JERSEY .....	29
TABLA 2 POTENCIALES DE OXIDACIÓN DE AGENTES OXIDANTES .....	35
TABLA 3 PRINCIPALES REACCIONES DESCRITAS EN EL PROCESO FENTON .....	37
TABLA 4 ANEXO 01 DE VMA PARA DESCARGAS AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO ..	41
TABLA 5 PROPIEDADES FÍSICAS DEL PERÓXIDO DE HIDRÓGENO Y EL AGUA .....	43
TABLA 6 PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE CANTIDAD DE PERÓXIDO ESTEQUIOMÉTRICO PARA UN TRATAMIENTO .....	53
TABLA 7 VARIABLES INDEPENDIENTES Y LOS NIVELES .....	55
TABLA 8 ESPECIFICACIÓN DE REACTIVOS UTILIZADOS.....	56
TABLA 9 CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS DE LOS RESIDUOS LÍQUIDOS DE LOS SALONES DE BELLEZA.....	57
TABLA 10 VALORES DE DQO Y PH OBTENIDO EN LABORATORIO .....	57
TABLA 11 VALORES DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES.....	58
TABLA 12 PUNTOS DE CURVA DE CALIBRACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE DQO .....	58
TABLA 13 RESULTADO DE DQO DE LOS RESIDUOS LÍQUIDOS DE LOS SALONES DE BELLEZA .....	59
TABLA 14 ABSORBANCIAS OBTENIDAS DESPUÉS DEL TRATAMIENTO FOTO-FENTON ..	60
TABLA 15 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO DE LAS MUESTRAS TRATADAS POR FOTO-FENTON .....	60
TABLA 16 REDUCCIÓN DE DQO MEDIANTE TRATAMIENTO FOTO-FENTON.....	61
TABLA 17 CRITERIOS DE BIODEGRADABILIDAD SEGÚN LA RELACIÓN DBO <sub>5</sub> /DQO .	62
TABLA 18 PH INICIAL Y FINAL A DIFERENTES CANTIDADES DE H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	65
TABLA 19 RESIDUOS DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE DQO .....	66
TABLA 20 PRUEBA DE VARIANZA .....	67
TABLA 21 INFORMACIÓN DE FACTORES .....	68
TABLA 22 ANÁLISIS DE VARIANZA (TABLA ANOVA) .....	68
TABLA 23 AGRUPACIÓN DE RESULTADOS DE PARA LOS NIVELES DE POTENCIAL DE HIDRÓGENO, UTILIZANDO EL MÉTODO DE TUKEY CON UNA CONFIANZA DE 95% ..	70

TABLA 24 AGRUPACIÓN DE RESULTADOS DE PARA LOS NIVELES DE CANTIDAD DE PERÓXIDO DE HIDRÓGENO, UTILIZANDO EL MÉTODO DE TUKEY CON UNA CONFIANZA DE 95% .....	70
TABLA 25 AGRUPACIÓN DE RESULTADOS PARA LA INTERACCIÓN DE POTENCIAL DE HIDRÓGENO Y CANTIDAD DE PERÓXIDO DE HIDRÓGENO, UTILIZANDO EL MÉTODO DE TUKEY CON UNA CONFIANZA DE 95% .....	71

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 INTERVALOS DE APLICACIÓN DE DIFERENTES TRATAMIENTOS DE OXIDACIÓN PARA AGUAS .....	31
FIGURA 2 DIAGRAMA DE POURBAIX .....	39
FIGURA 3 DIAGRAMA DE TRATAMIENTO FOTO-FENTON .....	46
FIGURA 4 SISTEMA DE TRATAMIENTO FOTO FENTON.....	46
FIGURA 5 CURVA DE CALIBRACIÓN DE ANÁLISIS DQO .....	59
FIGURA 6 REMOCIÓN DE DQO A pH 3 Y pH 5 .....	63
FIGURA 7 REMOCIÓN DE DQO A DIFERENTES CANTIDADES DE PERÓXIDO DE HIDROGENO. ....	64
FIGURA 8 COMPORTAMIENTO DE pH EN FUNCIÓN DEL TIEMPO A DIFERENTES CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN .....	65
FIGURA 9 PRUEBA DE NORMALIDAD DE ERRORES .....	66
FIGURA 10 GRÁFICA DE INTERACCIÓN PARA REMOCIÓN .....	69
FIGURA 11 GRÁFICA DE CONTORNO DE REMOCIÓN VS. POTENCIAL DE HIDROGENO; CANTIDAD DE PERÓXIDO DE HIDRÓGENO .....	71
FIGURA 12: EQUIPOS DE TRATAMIENTO FOTO-FENTON.....	87
FIGURA 13: REACTIVOS DE TRATAMIENTO FOTO-FENTON .....	87
FIGURA 14: ANÁLISIS DE DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO.....	88
FIGURA 15: TRATAMIENTO FOTO-FENTON.....	88
FIGURA 16: AGUAS RESIDUALES DE SALONES DE BELLEZA ANTES Y DESPUÉS DE TRATAMIENTO.....	89
FIGURA 17: ENVÍO DE MUESTRAS AL LABORATORIO ACREDITADO.....	89

# 1. CAPITULO I

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El objetivo del presente capítulo es brindar los principales conceptos, además de una breve introducción a los diversos tratamientos de aguas residuales, enfatizando en uno de los procesos de tratamiento, en este caso mediante las reacciones Fenton, teniendo como objetivo final la aplicación del Método foto-Fenton al tratamiento de aguas residuales provenientes de salones de belleza. Así mismo se presenta un análisis al proceso de gestión de este tipo de aguas residuales y el impacto al medioambiente. Las características fisicoquímicas, debido a que tienen compuestos recalcitrantes en su composición, consecuentemente, se sugieren la implementación de procesos de oxidación avanzados de tratamiento con la finalidad de cumplir con la normatividad legal vigente correspondiente a la calidad de agua.

### 1.1. ANTECEDENTES

Edge, (2015) en su investigación titulado “Eficiencia de la reacción Fenton para la degradación del tinte rojo allura: Aplicación para sistema de tratamiento de agua residual en peluquería”, analiza la efectividad de degradación del tinte rojo Allura mediante la reacción de Fenton. Realizó tres experimentos diferentes, el primero sin agitación, el segundo con agitación y el tercero con diferentes niveles de pH utilizando citrato de sodio y fosfato de sodio como tampones para controlar los niveles de pH; en todos los casos se midieron el tinte restante mediante absorbancia. Encontró que el tratamiento es eficaz en el rango: para el hierro de  $1,1 \times 10^{-1}$  mM a  $5,4 \times 10^{-1}$  mM y peróxido de hidrógeno de  $4,04 \times 10^{-2}$  mM a  $4,04 \times 10^{-1}$  mM. Fue ineficaz degradar el colorante a pH 2; a pH 7 sin tampones fue el más eficaz. Estos resultados fueron inesperados porque la literatura sobre la reacciones ocurridas en el proceso de Fenton afirma que es ineficaz a niveles de pH cercanos al neutro.

El objetivo propuesto por Silva A. et al., (2009) en su trabajo “Tratamiento de contaminantes orgánicos por foto-Fenton” fue reducir el impacto contaminante de los efluentes líquidos orgánicos generados por los diversos experimentos realizados en los laboratorios de la Universidad de Medellín mediante la técnica de foto-Fenton. Las variables de la presente investigación en la universidad de Medellín fueron la concentración de hierro, para lo cual se variaron entre los valores de 5 mg/L y 50 mg/L además de la concentración de peróxido variado en el rango entre 200 mg/L y 500 mg/L. Determinando los valores optimos Fe y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> con 27.5 mg/L y 300 mg/L respectivamente, para la remoción del parámetro de Carbono Orgánico

Total (COT). Así mismo se obtiene un valor óptimo de 2.8 en pH con la finalidad de impedir que se formen los hidróxidos de hierro, para lo cual se precipitaría en el medio con ácido sulfúrico 2N.

Delgado Nina & Santander Pacoricona, (2017), realizaron su investigación “Remoción de coloración de tintes de teñido en aguas residuales provenientes de la industria textil, utilizando Procesos de Oxidación avanzada (POA)” con la finalidad de determinar la eficiencia de los POA’s para la degradación de materia orgánica que contienen compuestos recalcitrantes (evaluados mediante la remoción de la demanda química de oxígeno DQO) y así también la decoloración de tintes (% de remoción de teñido) en muestras sintéticas, las cuales fueron preparados con tinte textil Azul Blue (R-19) y las muestras de las aguas residuales provenientes de la textilería. Se utilizó POA’s de:  $(\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}_2)$ ,  $(\text{TiO}_2/\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2)$ ,  $(\text{TiO}_2/\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3)$ ,  $(\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}_2)$ ,  $(\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV})$ ,  $(\text{TiO}_2/\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}/\text{O}_3)$ ,  $(\text{TiO}_2/\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV})$  y, controlando los niveles de temperatura y pH. Se encontró los valores óptimos de 12 °C de temperatura y 6.8 de pH para la mejor remoción del DQO a un 75.68 % con el proceso de oxidación avanzada  $(\text{TiO}_2/\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV})$ , caso contrario sucede para la muestra con decoloración del tinte textil Azul Blue(R-19) donde se obtuvo una remoción del 95.44 % en soluciones estándar. Por otro lado para la muestra de agua residual proveniente de la textilería se obtuvo un rendimiento de 89.06 %, bajo las condiciones del POA  $(\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}/\text{O}_3/\text{UV})$  a un pH de 7.8 y a una temperatura de 12 °C.

Bautista et al., (2007), en la investigación titulada, “Aplicación de la oxidación avanzada en el tratamiento de aguas residuales cosméticas”, manifiestan que la aplicación del proceso de oxidación Fenton permite alcanzar el límite regional de DQO para los efluentes industriales vertidos al sistema de alcantarillado. Por lo que en esta investigación se evaluó la degradación de materia orgánica (DBO<sub>5</sub> y DQO) contenidas en las aguas residual de la derivación de la industria cosmética, donde se han optimizado las condiciones de operación (temperatura, así como las concentraciones de iones ferrosos y peróxido de hidrogeno). Se inicio el trabajo con un pH igual a 3, además de una concentración de  $\text{Fe}^{2+}$  de 200 mg/L y una relación en peso inicial en base a la concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$  respecto a las concentraciones de DQO correspondiente al valor estequiométrico teórico ( 2.19), lográndose así una conversión de DQO superior al 45 % a 25 °C y al 60 % a 50 °C, además se obtuvo una ecuación de segundo orden, la cual describe la cinética global del proceso dentro de un amplio rango de conversión de DQO que cubre hasta el 80-90 % de la conversión máxima alcanzable.

Según lo manifestado por Rivas Garrido, (2018) en su trabajo “Aplicación de proceso foto-Fenton en aguas con parabenos análisis de foto degradación y foto detoxificación”, estudió la

foto degradación y detoxificación mediante el proceso de tratamiento foto-Fenton de los parabenos, siendo el metilparabeno y propilparabeno comúnmente usados en la industria cosmética como preservantes. Encontrándose valores óptimos a escala laboratorio a un pH de 2.8 con la adición de  $\text{H}_2\text{O}_2$  14 uL para un contenido de una muestra de 250 mL de agua residual, así mismo se llevó a escala piloto donde se obtuvo resultados de foto degradación eficiente.

De igual manera en el trabajo “Tratamiento de efluentes de la industria cosmética mediante el reactivo fenton y la adsorción”, liderado por Pereira, (2015), el objeto de estudio fueron las aguas industriales provenientes de la manufactura cosmética en Goiania (Brasil). Asimismo, posterior de la aplicación del reactivo Fenton se realizó los análisis respectivos, adicional a ello la adsorción y los procesos combinados.

En el tratamiento mediante el proceso de Foto Fenton, se efectuó un diseño factorial 2 x 3, para los factores: concentraciones de  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  y pH. Los mejores resultados en el presente experimento se obtuvieron en las siguientes concentraciones de  $\text{Fe}^{2+}$  de  $184.21 \text{ mg L}^{-1}$ ; la concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$  de  $1300 \text{ mg L}^{-1}$  y un pH de 3.5. Posteriormente, las aguas residuales sometidas mediante el reactivo de Fenton, posterior a ello pasaron mediante el proceso de adsorción, en el que se probaron siete tipos de carbón activado. El carbón activado que presentó la mejor eficiencia en la reducción de los valores de los parámetros ambientales se sometió a pruebas cinéticas a diferentes temperaturas y tiempos de contacto. El tiempo de equilibrio se alcanzó en 16 minutos (probado en el rango de 4 min a 24 h); además se verificó que el incremento de la temperatura, no contribuyó a dicha eliminación de los parámetros ambientales (probados en el rango de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Según, Ramos-Jiménez & Jiménez-Barrios, (2016) en la investigación titulada, “Degradación de residuos tóxicos provenientes de laboratorios universitarios con foto-Fenton Solar usando diseño de experimentos”, investigan la eficiencia de degradación de los residuos tóxicos de los laboratorios universitarios, al caracterizar inicialmente se obtiene 2500 ppm de fenoles y DQO de  $67000 \text{ mg O}_2/\text{L}$ . Se realizó el experimento de oxidación avanzada a través de foto-Fenton Solar, basado en el diseño experimental de tipo compuesto con la finalidad de estudiar la interacción de las variables, siendo las concentraciones del peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) y hierro (Fe) respectivamente, determinando la eficiencia del estudio mediante el % de remoción del DQO. Se evaluó que la variable relevante fue la concentración del peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), respecto a la eficiencia del proceso evaluada mediante la remoción de DQO. Los valores óptimos para lograr una mejor remoción en un 97% de la DQO fue  $9 \text{ g/L}$  de hierro

(II) y de 220.7 g/L de peróxido de hidrógeno, así mismo se obtuvo los compuestos de ácido fórmico y oxálico como resultado de la degradación del proceso foto-Fenton.

Como lo menciona Anaya Meléndez, (2019), en su investigación titulada “Tratamiento de aguas residuales colorantes reactivos mediante proceso de oxidación avanzada Fenton y variantes”, donde se realizó la evaluación de los tratamientos mediante el proceso Fenton y  $H_2O_2/UV$ , realizándose en muestras en decoloración del reactivo Sunfix Yellow S4GL, colorante presente en las aguas residuales de las textilerías. Se obtuvo los valores óptimos para método de oxidación avanzada con  $H_2O_2/UV$ , encontrándose concentraciones de 1292 mg/L de  $H_2O_2$ , 3 de pH y además de 3 lámparas UVC, logrando una decoloración del 100 % en un tiempo de 40 minutos con exposición a la radiación de la luz UV. Caso contrario con el método foto-Fenton, se encontró los valores óptimos de 3,52 mg/L para la concentración de hierro ( $Fe^{+3}$ ), 2,51 de pH con 2 lámparas UV, para este estudio se consiguió un menor tiempo de 30 minutos de exposición a la radiación luz UV para una decoloración al 100 %. En ese sentido se determinó que el proceso mediante la aplicación de foto-Fenton es más eficiente en relación al  $H_2O_2/UV$ , por emplear una menor concentración del peróxido de hidrógeno, además de menor potencia radiación de luz UV y lograr una decoloración del 100 %

## **1.2. Marco Teórico**

### **1.2.1. Agua residual**

#### **1.2.1.1. Definición**

Según la OEFA (2014), las características originales de este tipo de agua son afectadas por las actividades humanas. No obstante, para su descarga a un cuerpo natural de agua superficiales o al alcantarillado es necesario realizar un previo tratamiento

#### **1.2.1.2. Tipo de aguas residuales**

Se consideran los siguientes tipos de aguas residuales, conforme lo menciona la OEFA (2014):

- **Aguas Residuales Industriales**

Son efluentes de un proceso de producción de las industrias tales como la actividad minera, cosmética, curtiembre, textilería, carnicera, entre otras.

- **Aguas Residuales Municipales**

Las aguas residuales son provenientes de las descargas de las aguas de tipo doméstica y las aguas residuales industriales las cuales fueron previamente tratadas y adecuadas para su descarga en el sistema de alcantarillado.

- **Aguas Residuales Domésticas**

Estas aguas residuales son productos de las descargas de las actividades antropogénicas, siendo de origen comercial y comercial.

- **Aguas residuales no Domesticas**

Para la MVCS (2019), este tipo de agua no doméstica son generadas por actividades económicas e industriales, no consideradas los efluentes de las actividades antropogénicas como la preparación de alimentos, así también productos de las descargas del aseo personal y desecho fisiológico.

### **1.2.2. Salones de bellezas en el Perú**

Montero Reyes (2020), menciona que uno de los comercios que se han ido proliferando en los últimos años, principalmente en zonas urbanas y en menor proporción en algunas zonas rurales, son los salones de bellezas. El Instituto Nacional de Estadística e Informática en un reporte sobre demografía empresarial, detalla que el número de salones de belleza en el Perú llegó a 35,882 en el primer trimestre del 2019 y que representaba un crecimiento de 2.4 % favorecido por la migración venezolana y el mayor poder de consumo de la clase media.

Para el objeto de estudio de la Peluquería y los diversos tratamientos en los salones de belleza está dentro de la clasificación de la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU) por la clase 9602 de acuerdo a la Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria (*Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU) - Gobierno Del Perú*, 2020); las actividades a la que se dedican son de gran variedad y se les puede encontrar como peluquerías, Spa's, centros de relajación y masajes, centros para el cuidado personal, y la gran mayoría brindan, de acuerdo a Cervantes Rodríguez et al., (2020):

- El servicio de peinado, corte, recorte, coloración, decoloración, ondulación y alisado del cabello y actividades a fines para mujeres y hombres
- Recorte, afeitado y teñido de la barba para hombres
- Cosmética facial (maquillaje y masajes), además de manicura y pedicura, entre otros.

### **1.2.3. Aguas residuales de salones de belleza**

Las aguas residuales resultantes de las descargas de los salones de belleza están clasificados como aguas residuales comercial; y pueden estar contaminado, entre otros, principalmente con disolventes, tintes y permanentes que contienen amoniaco e insumos químicos como el peróxido de hidrógeno y materiales derivados del petróleo, según lo aluden Castillo Cortés et al., (2012), que son los productos químicos que requieren en su composición de los productos para los servicios que ofrecen los salones de belleza. Debido al pequeño volumen de desechos que se genera, podría argumentarse, que los impacto al medio ambiente por salones de belleza es mínimo en comparación a los grandes volúmenes de descarga de las industrias o comercios, sin embargo, es necesario realizar un análisis más profundo sobre el impacto de estos desechos, debido a que muchos de estos contaminantes son recalcitrantes y afectan negativamente la eficiencia de los tratamientos biológicos que existen una vez ingresado a los sistemas de tratamientos municipales, por lo que estos desechos líquidos no podrían ser considerados usuales.

#### **1.2.3.1. Características de aguas residuales de los salones de belleza**

Arangure, (2013), afirma que la composición y los parámetros fisicoquímicos de calidad de las aguas residuales generados por los salones de belleza dependen del tipo de productos utilizados, los cuales podrían contener amoniaco o ser compuestos biodegradables o no; por otro lado mencionar que la cantidad de volumen de estos vertidos son intermitentes y mínimos; sin embargo pueden influenciar negativamente en el ambiente, pues algunos presentan valores incrementados en los parámetros de metales pesados como plomo y cadmio, además de aceites y grasas, sumado a ello los servicios que brindan, requieren del empleo de una gran variedad de aplicación de productos químicos para la elaboración de tintes para cabello, acondicionadores, blanqueadores y otros productos de tratamiento del cabello.

En 1992, el Departamento de Protección Ambiental de Nueva Jersey inició un programa para muestrear los desechos líquidos de ocho salones de belleza, con el fin de determinar las características de los residuos líquidos generados por dichas instalaciones y que sirva de base para regularlos adecuadamente, los resultados obtenidos se exponen en la *Tabla 1*.

## **1.2.4. Contaminantes comunes del agua residual de un Salón de Belleza**

### **1.2.4.1. Tintes**

Gupta & Suhas (2009), definen a los tintes como compuestos orgánicos sintéticos que contienen nitrógeno como grupo azoico (-N=N-) en su estructura molecular. El doble enlace N=N es la característica clave de un compuesto azoico. Estos tintes pueden producirse en una amplia gama de colores con relativa facilidad sintética. Por estas razones, los tintes azoicos son ampliamente utilizados. Asimismo, Hernández et al. (2019), han estimado que existen más de 5000 sustancias químicas en la composición de la producción de los tintes, siendo los más utilizados:

- **Parafenilendiamina (PPD):**

Este compuesto se usa en un medio contraste para tonos en los tintes de colores oscuros, debido que componen el alquitrán de hulla. Este compuesto puede producir cáncer debido que es un derivado del petróleo.

- **Acetato de plomo:**

Es un insumo empleado para tintes oscuros, considerado como colorante metálico. Este tipo de colorante puede presentar efectos de anemia y problemas neurológicos.

- **Hidantoína (1,3-Bis(hidroximetil)-5,5-dimetilimidazolidin-2,4-diona):**

Es utilizado como conservante en ese producto, el cual expide el compuesto químico formaldehído, así también actúa como protector para el cuero cabelludo ante pequeñas heridas provocadas por los tintes. Por sus características puede ser irritante, y llegar a ser cancerígeno.

- **.Aminas aromáticas:**

La mayoría de los tintes contienen aminas de tipo aromáticos que pueden estar asociados a los diversos tipos de cáncer. Por ejemplo, las toluidinas pueden producir cáncer de vejiga.

**Tabla 1***Parámetros de aguas residuales y lodos de los salones de belleza de Nueva Jersey.*

PARAMETRO	VALORES (ug/L)
Aluminio	133
Antimonio	6
Arsénico	5
Bario	38
Calcio	3 800
Cadmio	10
Cromo	10
Cobre	854
Hierro	204
Plomo	29
Magnesio	1 200
Manganeso	10
Niquel	100
Potasio	9 900
Plata	723
Sodio	75 000
Zinc	632
Cloroformo	36
Tolueno	110
Antraceno	6
Fenol	57
Dimetil ftalato	11
Fluoranteno	20
Pireno	15
benzilbutilftalato	140
DI-N-Octil ftalato	17
Dietil ftalato	287
Bis(2-Etilexil ftalato=	330
Nitrofenol-4	37
fenantreno	34
Amoniac -N	29 000
Nitrato/Nitrito N	400
Carbón orgánico total	58300
Cloruro	100 000
Aceite y grasas	60 000
Sulfato	33 000

Nota: Está tabla muestra los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímicas de los residuos de ocho salones de belleza en 1992. Bowers (2002 p.4)

#### **1.2.4.2. Amoníaco (NH<sub>3</sub>):**

Es un compuesto que produce la apertura de la cutícula del cabello, facilitando así la coloración del cabello. Este tiene un efecto negativo de la irritación pulmonar.

#### **1.2.4.3. Parabenos**

Hernández et al. (2019), considera a los parabenos como conservantes, también se encuentran en los champús, acondicionadores, cremas hidratantes, etc. Este usada como bactericida y fungicida dentro de su composición de estos productos de belleza.

#### **12.4.4. Tensioactivos**

Adak et al. (2005), puntualizan que un tensioactivo es una sustancia química que es a la vez hidrófila y lipofílica, y los tipos de tensioactivos se diferencian por su caracterización iónica. Hay cuatro tipos: aniónicos, no iónicos, catiónicos y anfóteros. Los tensioactivos se utilizan con frecuencia en los cosméticos. Sus principales usos en cosmética son la limpieza, la emulsión, la solubilización y el acondicionamiento. La cantidad de tensioactivos en las aguas residuales no está clara, pero se pueden utilizar métodos tradicionales y PAO para eliminar los tensioactivos.

#### **1.2.5. Tratamientos de aguas residuales**

Existen diferentes procesos para la degradación de contaminantes de las descargas de los descargas líquidas generados por las actividades de hombre; estos tratamientos deben ser adecuados para eliminar total o parcialmente los contaminantes hasta obtener valores dentro de los límites máximos admisibles requerido por la legislación vigente; estos grados de remoción se pueden conseguir mediante las diversas técnicas y/o la combinación de estas.

##### **a. Métodos no destructivos**

- Filtración, nanofiltración, ultrafiltración
- Extracción con disolventes
- Decantación
- Adsorción (Carbón activado y/u otros adsorbentes)
- Desorción

##### **b. Métodos destructivos**

- Tratamientos biológicos (tratamiento aerobio y anaerobio)
- Oxidación química:

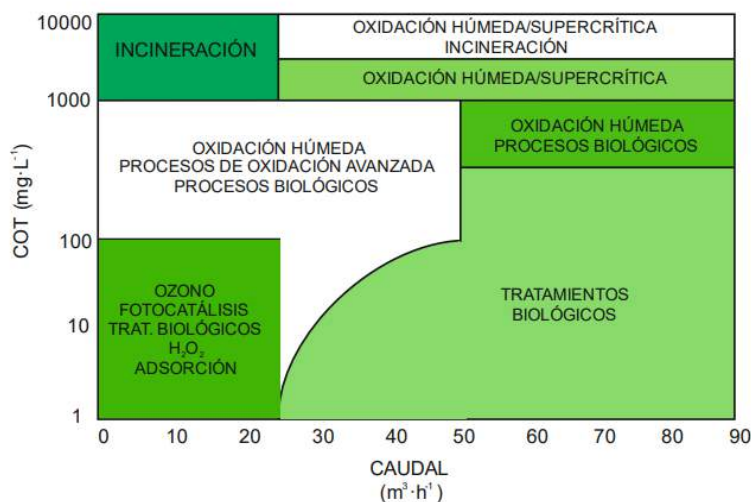
- Incineración
- Oxidación húmeda mediante el proceso supercrítico
- Procesos de oxidación avanzada
- Oxidación húmeda
- Oxidación no catalítica
- Hidrogenación

El objetivo final de los tratamientos es la remoción total o parcial de los contaminantes mediante la separación (técnicas no destructivas) y/o destrucción (técnicas destructivas); las técnicas destructivas buscan la mineralización total o parcial de los contaminantes. Sin embargo, resulta muy caro aplicar una solo estas técnicas, por lo que puede considerar la opción de modificar los contaminantes de los efluentes en compuestos más biodegradables, una técnica y complementarla por otras técnicas más factibles.

La aplicación de una técnica de tratamiento, depende principalmente de la concentración de la composición química de los contaminantes y el volumen de caudal para el tratamiento. La figura 1 detalla los intervalos de aplicación más adecuado para los tratamientos

**Figura 1**

*Intervalos de aplicación de diferentes tratamientos de oxidación para aguas*



Nota: Pliego Rodriguez (2012)

### 1.2.5.1. Filtración

Rodriguez Fernández-Alba et al. (2006), definen al proceso de filtración como un tratamiento físico donde las aguas residuales atraviesan un medio con características porosas

con la finalidad de contener la mayor parte del material contaminante. Del mismo modo, Edge (2015), precisa que este método es empleado por la gran mayoría de sistemas de tratamientos municipales; sin embargo, este método no son eficaces para eliminar tintes; por lo que se requiere sistemas avanzados como ultrafiltración, nano filtración y ósmosis inversa, todos los cuales implican forzar el paso del agua a través de membranas con poros muy finas (de escala manométricas), el cual que impiden el paso de los contaminantes. Estos procesos son muy efectivos para eliminar el tinte de las aguas residuales; sin embargo, demandan un alto consumo de energía, requieren altas presiones y generan desechos por el uso de membranas.

#### **1.2.5.2. Químicos**

Los procesos químicos se utilizan generalmente para complementar y/o mejorar a los procesos físicos como la filtración y/o sedimentación. Este proceso involucra el uso de agentes coagulantes o floculantes que pueden usarse para eliminar metales de las aguas residuales típicas. Las fases típicas de los procesos químicos incluyen agregar los productos químicos, mezclar rápidamente para crear una solución homogénea, mezclar lentamente para crear floculación y luego filtrar para eliminar contaminantes. Los procesos químicos eliminan ciertos tintes, pero son ineficaces para eliminar los tintes azoicos.

Otro problema que se encuentra con los procesos químicos es que producen grandes cantidades de lodos.

#### **1.2.5.3. Biológicos**

Gupta & Suhas (2009), califican el tratamiento biológico como el uso de organismos, a saber, bacterias y hongos, para eliminar contaminantes como el tinte de las aguas residuales. Además, detallan que hay tres tratamientos biológicos diferentes que son aeróbicos, anaeróbicos o una combinación de los dos. Rai et al. (2005), aclaran que el tratamiento aeróbico implica el uso de oxígeno y se ha descubierto que es eficaz para eliminar varios tintes no azoicos. Se ha descubierto que los hongos degradan algunos colorantes azoicos, pero provocan la biodegradación y el mantenimiento del sistema; en tanto que, el tratamiento anaeróbico no requiere oxígeno y se ha descubierto que unas variedades de tintes sintéticos son biodegradables; sin embargo, se ha determinado que los colorantes azoicos no son biodegradables. Además, Delée et al. (1998), aclara que el tratamiento anaeróbico no requiere aireación a diferencia del aerobio que reduce el costo, mientras que los inconvenientes del tratamiento anaeróbico incluyen una eliminación insuficiente de DBO y los tintes no se degradan. Gupta & Suhas (2009), en sus conclusiones de investigación, refiere que en una combinación de tratamiento aeróbico y anaeróbico, los estudios han demostrado que los

colorantes azoicos pueden eliminarse de las aguas residuales mediante uso de post tratamiento aeróbico del sistema; sin embargo, el costo del pos tratamiento aumenta el costo del sistema. El tratamiento biológico es un método económico para tratar las aguas residuales; sin embargo, no puede tratar todos los tipos de tintes, a saber, los tintes azo. Otros aspectos negativos del tratamiento biológico incluyen las limitaciones en el diseño y la viabilidad operativa y el hecho de que consume espacio y el tratamiento puede llevar mucho tiempo.

#### **1.2.5.4. Oxidación**

La oxidación química implica el uso de agentes oxidantes. Los procesos oxidativos son los más utilizados para eliminar el tinte y generalmente implican el control del pH. El cloro se usa típicamente como desinfectante o blanqueador químico en aguas residuales e instalaciones industriales, pero también se puede usar en la oxidación de tintes. La oxidación del cloro es más eficaz con tintes solubles en agua, incluidos los tintes azo. El costo y la eficiencia se pueden mejorar con el uso de cloro gaseoso, pero también pueden producir efectos secundarios negativos, como un aumento de halógenos orgánicos en el agua tratada y corrosión en recipientes metálicos.

Otro agente oxidante es el peróxido de hidrógeno., debido que es un componente común usado para el blanqueo. Aunque el peróxido de hidrógeno es utilizado también en la oxidación del tinte, el proceso se puede mejorar añadiendo hierro como catalizador. Esto se llama reacción de Fenton el cual será descrito en la siguiente sección.

#### **1.2.6. Procesos de oxidación avanzada (POAs)**

Conforme a Torres Andrade (2014), los procesos de oxidación avanzada (POAs) se implementaron con la finalidad de contar con una propuesta más eficiente en comparación a los métodos tradicionales, no obstante es importante brindar el énfasis en los aspectos técnicos necesarios.

Los POAs principalmente son identificados por la obtención de radicales **OH•** mediante métodos químicos, fotoquímicos u otras formas de energía las cuales degradan los contaminantes. e incluso se puede obtener una eficiencia en la remoción de contaminantes refractarios difíciles de degradar mediante procesos biológicos.

También de Bandala et al. (2008), se sabe que los POAs oxidan los contaminantes orgánicos en CO<sub>2</sub> y son atractivos debido a su capacidad de utilizar recursos renovables como el sol como fuente de fotólisis UV. Las técnicas utilizadas en los POAs incluyen la fotocatalisis y la sonólisis. De igual manera, Gupta & Suhas (2009), indican que también hay varios procesos en los que intervienen el ozono y el compuesto del peróxido de hidrógeno con luz UV.

### 1.2.7. Ventajas de los POAs

- Este proceso también es considerado para disminuir la concentración de los componentes generados en las etapas iniciales de todo tratamiento de agua residual.
- La eficiencia se basa en el tiempo de reacción, debido que actúa en menor tiempo en comparación otros métodos de tratamiento.
- Se logra una eficiencia de remoción utilizando reactivos con bajas concentraciones.
- Este proceso inhibe que se generen subproductos o incluso que se formen en bajas concentraciones.
- Ocurre una transformación química del contaminante, logrando óptimos resultados de eficiencia en el proceso.
- Se obtiene buenos resultados en la eliminación del color de los efluentes.
- Al utilizar radiación ultravioleta UV se optimiza los parámetros de la velocidad de la reacción y tiempo de contacto.

### 1.2.8. Radical hidroxilo

Reconocido también como radical libre, este radical contiene como mínimo un electrón desapareado en su capa más externa, este electrón causa que sus radicales sean altamente reactivos. Haber y Weiss en el año 1934 fueron los primeros en descubrir la reacción Fenton.

El radical hidroxilo ( $\text{OH}^\bullet$ ) tiene una estructura compuesta por dos átomos, una de hidrógeno y otra de oxígeno, este último hace que sea altamente reactivos, permitiéndole así que puedan formar fácilmente moléculas de agua con los átomos de hidrógeno.

El radical hidroxilo, componente generado en el proceso fenton, es un agente oxidante ubicado entre los mas resistentes en la tabla 2. potenciales de oxidación en relación a otros agentes oxidantes.

Tabla 2

*Potenciales de oxidación de agentes oxidantes*

Oxidante	E°/V	Oxidante	E°/V
F <sub>2</sub>	3.06	KMnO <sub>4</sub>	1.7
<b>OH•</b>	2.8	HO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	1.7
O <sub>2</sub> (Atómico)	2.42	HOCl	1.49
O <sub>3</sub>	2.01	Cl <sub>2</sub>	1.27
H <sub>2</sub> SO <sub>5</sub>	1.81	ClO <sub>2</sub>	1.27
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1.76	O <sub>2</sub> (Molecular)	1.2

Fuente: Peña R. & Díaz B. (2020)

### 1.2.9. Características fisicoquímicas

El radical hidroxilo presenta las siguientes características:

- Reaccionan su mayoría con las moléculas orgánicas
- Debido a su corta vida útil (aproximadamente un Segundo), los radicales se producen in situ, ya sea por oxidación de agua o iones hidróxido
- Presenta una naturaleza altamente oxidante, debido a su alto potencial de oxidación (2,8 V)
- Es un radical libre neutro
- Tiene una electroafinidad en el agua de aproximadamente 5.8 eV
- En una solución fuertemente básica, tiende a disociarse iónicamente, por comportarse como un ácido débil.

### 1.2.10. Proceso Fenton

Ameta et al. (2018), manifiestan que el proceso oxidación Fenton,, fue reportado por H. J. Fenton en 1984, refiriéndose al uso de potencial de oxidación del peróxido de hidrógeno, mejorando su acción oxidativa usando como catalizador el hierro (Fe). Actualmente, según Dunford (2002), existen dos teorías que describen cómo se produce la reacción de Fenton.

La primera teoría incorpora la química de los radicales. En el proceso de oxidación avanzada Fenton, los radicales se producen cuando el hierro (II) se oxida a hierro (III). Las ecuaciones ( 1.1), ( 1.3) y ( 1.7) detallan las reacciones que suceden. El hierro (III) se reduce de nuevo a hierro (II), lo que se presenta en la ecuación ( 1.2). La ecuación ( 1.4) muestra la reacción del peróxido de hidrógeno con un radical hidroxilo, para producir agua y otro radical. Estos radicales producidos, se encargan de degradar los compuestos orgánicos, ecuación ( 1.16), eliminando un electrón y a la vez generando otro radical. La química radical continuará finalizando cuando los radicales interactúen con otros radicales.

La segunda teoría de la química de Fenton, conforme a Kremer (1999), diferente a la teoría de los radicales, menciona que el proceso Fenton, son sólo las reacciones con peróxido de hidrógeno y hierro las que degradan los compuestos orgánicos. En tanto, Dunford (2002), menciona que la teoría de los radicales es la más aceptada.

Peña R. & Díaz B. (2020), describen algunas desventajas que presentan el tratamiento Fenton al momento de su aplicación, siendo de los más relevantes de ellos las condiciones pH, que generalmente debe ser ácidas; además el hierro y peróxido de hidrógeno son reactivo necesarios a agregar, impactando en los costos, almacenamiento y transporte, además el impacto ambiental por la generación de grandes cantidades de lodos de las sales. Frente a esto se propone procesos Fenton modificados, con el mismo fundamento de la reacción Fenton, como: Electro Fenton, Fenton-Like, foto-Fenton, Bioelectro-Fenton.

### **1.2.11. Factores que influyen sobre la reacción de Fenton**

Para, Mirzaei et al., (2017) reporta que existen muchos parámetros que influyen en la reacción de Fenton, tales como dosis de reactivos, concentración de contaminantes, tipo de catalizador, pH, intensidad de radiación (en reacciones foto Fenton), matriz del efluente, concentración de sales inorgánicas, modo de alimentación del reactivo Fenton, temperatura, tiempo de reacción, desactivación del catalizador y productos formados y entre otros. A continuación, se detalla los factores que influyen de manera significativa.

#### **1.2.11.1. Concentración de los reactivos**

Un adecuado uso de la concentración de los reactivos evitará costos de operación adicionales por el uso de reactivos en exceso y reducirá las dificultades para eliminar el hierro en exceso en el post tratamiento. La cantidad del peróxido de hidrogeno es esencial porque es la fuente principal de radicales  $\text{OH}^\bullet$  del proceso, sin embargo, el efecto captador de radicales del  $\text{H}_2\text{O}_2$  cuando hay altas concentraciones (ecuación ( 1.4) y ( 1.9)), y la auto descomposición de  $\text{H}_2\text{O}_2$  en  $\text{O}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  (ecuación ( 1.9)), pueden reducir significativamente la eficiencia del proceso.

#### **1.2.11.2. Dosis de $\text{H}_2\text{O}_2$ / $\text{Fe}^{2+}$**

Como ya se describió, la concentración del peróxido de hidrogeno e hierro son factores importantes que influyen en el proceso de Fenton. Sea el exceso o deficiencia de estos reactivos impactan negativamente en la eficiencia del proceso.

**Tabla 3***Reacciones principales presentes en el proceso Fenton*

Reacción	k(M.s <sup>-1</sup> )	
$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + OH^\bullet + HO^-$	76	( 1.1)
$Fe^{3+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{2+} + H^+ + OOH^\bullet$	0.01	( 1.2)
$Fe^{2+} + OH^\bullet \rightarrow Fe^{3+} + HO^-$	$3.2 \cdot 10^8$	( 1.3)
$H_2O_2 + OH^\bullet \rightarrow H_2O + OOH^\bullet$	$2.7 \cdot 10^7$	( 1.4)
$OOH^\bullet \rightarrow O_2^- + H^+$	$1.58 \cdot 10^5 s^{-1}$	( 1.5)
$O_2^- + H^+ \rightarrow OOH^\bullet$	$1.0 \cdot 10^5$	( 1.6)
$Fe^{2+} + \cdot OOH \xrightarrow{+H^+} Fe^{3+} + H^+ + OOH^\bullet$	$1.2 \cdot 10^6$	( 1.7)
$OOH^\bullet + Fe^{3+} \rightarrow Fe^{2+} + O_2 + H^+$	$3.1 \cdot 10^5$	( 1.8)
$OH^\bullet + OOH^\bullet \rightarrow H_2O + O_2$	$1.0 \cdot 10^{10}$	( 1.9)
$OH^\bullet + OH^\bullet \rightarrow H_2O_2$	$4.29 \cdot 10^9$	( 1.10)
$OOH^\bullet + OOH^\bullet \rightarrow H_2O_2 + O_2$	$8.23 \cdot 10^5$	( 1.11)
$Fe^{3+} + O_2^- \rightarrow Fe^{2+} + O_2$	$5.0 \cdot 10^5$	( 1.12)
$Fe^{2+} + O_2^- \xrightarrow{+2H^+} Fe^{3+} + H_2O_2$	$1.0 \cdot 10^7$	( 1.13)
$OH^\bullet + O_2^- \rightarrow O_2 + OH^-$	$1.0 \cdot 10^{10}$	( 1.14)
$OOH^\bullet + O_2^- \rightarrow H_2O_2 + O_2$	$9.7 \cdot 10^7$	( 1.15)
<b>Contaminantes Orgánicos + OH<sup>•</sup> → Productos degradados</b>		( 1.16)

Nota: Pliego Rodriguez (2012 p. 14)

La eficiencia del proceso de Fenton mejora al aumentar la concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y de Fe<sup>2+</sup>, a causa de la mayor producción de radicales OH<sup>•</sup>. No obstante, el exceso de la dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, impacta en demanda química de oxígeno (DQO) remanente y produce radicales hidropéroxilo (OOH<sup>•</sup> E° = 1.65 V), ecuación ( 1.4), estos mismos disminuyen la eficiencia de la reacción (ecuación ( 1.9)); por otro lado, ocurre la reacción entre dos radicales OH<sup>•</sup> que puede generar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (ecuación ( 1.10)). La concentración óptima de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y de Fe<sup>2+</sup> según Peña R. & Díaz B. (2020) debe manejarse en función al tipo y la concentración de los contaminantes, algunos autores señalan que la relación H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>2+</sup> debe ser menor a 10.

El exceso o deficiencia de reactivos impactan considerablemente negativa en la eficiencia del proceso Fenton, además afectará en los costos de operación, como, por ejemplo,

el uso de reactivos en exceso involucra más operaciones para eliminar el hierro en exceso, de acuerdo con los estándares de efluentes, lo cual demanda más presupuesto.

Por lo mencionado anteriormente. Mirzaei et al. (2017), señalan la importancia del uso en una adecuada concentración de reactivos en el proceso Fenton. Por lo general, la relación óptima  $H_2O_2/Fe$  depende de la matriz de agua a oxidar. Se reporta que la relación  $H_2O_2/Fe^{2+}$  superior a 10 reduce la eficiencia del tratamiento Fenton, esto a causa de la captación de radicales hidroxilos, según la ecuación ( 1.3).

La ecuación ( 1.3) nos indica que la producción de radicales  $OH^{\bullet}$  en un proceso Fenton depende, además, de la concentración de iones  $Fe^{2+}$ . Una concentración mayor de la solución de  $Fe^{2+}$  puede mejorar la producción de radicales hidroxilo; sin embargo, se debe considerar que incremento adicionales en la dosificación de iones de hierro hasta por encima de la concentración óptima, brinda una mejora limitada en la degradación de los contaminantes, y, incrementan la turbidez de la solución por la presencia en exceso de lodos de hierro, que puede reducir la penetración de la luz ultravioleta en la solución, e impactar en la absorción de la luz necesaria para la fotólisis cuando se realiza tratamientos foto Fenton.

La reacción de foto-Fenton requiere una menor concentración de reactivos, en comparación al Fenton clásico, para lograr la misma velocidad de degradación, esto es debido a la generación de radicales hidroxilos adicionales y la reducción de iones  $Fe^{3+}$  que se discutirá más adelante.

#### **1.2.11.3. Temperatura**

En teoría, un incremento de temperatura debería mejorar la cinética de reacción, debido a que la temperatura aumenta la velocidad de reacción entre los reactivos, lo que provoca la generación de radical hidroxilo adicionales. Se reporta que el aumento de temperatura de reacción mejoraría la velocidad de descomposición del  $H_2O_2$  en un factor de 2 con cada aumento de temperatura de 10 °C; no obstante realizar la reacción a una temperatura superior a 40 °C puede disminuir la velocidad de eliminación. Además, a altas temperaturas, ocurre la descomposición del peróxido de hidrogeno en agua y oxígeno. También hay autores que reportan que no existen diferencias significativas en el resultado de las reacciones realizadas a temperatura ambiente o a 40 °C.

En el proceso de reacción de Fenton, las temperaturas optimas se encuentran dentro del rango de 25°C a 50°C

#### **1.2.11.4. Potencial de hidrógeno (pH)**

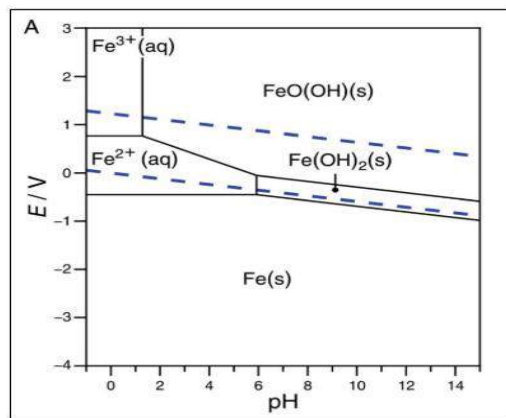
El pH modifica la reacción al cambiar el comportamiento del hierro.

La **Figura 2** muestra cómo existen el hierro (II) y el hierro (III) a los diferentes niveles de pH entre 0 a 14 y a medida que el potencial electroquímico cambia de -4 a 3. Al potencial electroquímico de 0,77 V, el  $\text{Fe}^{3+}(\text{aq})$  se reducirá a  $\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$  por debajo de un pH de aproximadamente 2. Los iones  $\text{Fe}^{3+}(\text{aq})$  y  $\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$  empiezan a precipitar de la solución y crear  $\text{FeO}(\text{OH})_{(\text{s})}$  en el rango de pH de 1,3 a 6. El ion  $\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$  también presenta precipitación, a un pH de 6.0 con la formación de  $\text{Fe}(\text{OH})_{2(\text{s})}$ . Si el hierro (II) precipita, las reacciones de la ecuación (1.1), no se producirán y reducirán la eficacia de la reacción de Fenton, como lo señalan, Bandala et al. (2008), Cheng et al. (2004) y Duesterberg et al. (2008)

Los valores de pH ácidos son ideales para el proceso Fenton, esto se encuentra en el rango de 2.5 a 3, a esto se integra el potencial de oxidación de los hidroxilos ( $\text{OH}^\bullet$ ), el cual regula naturalmente al disminuir el pH. Caso contrario, a pH con valores altos, se forman compuestos como los óxidos y oxi-hidroxidos de hierro impactando en la eficiencia del proceso.

**Figura 2**

Diagrama de Pourbaix

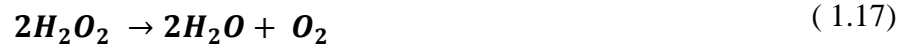


Fuente: Pesterfield et al. (2012)

### 1.2.12. Selección de óptima dosis del peróxido de hidrógeno

Se considera como variables influyentes, el hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ) y al peróxido de hidrogeno, conforme a Blanco J. (2009), por lo cual es importante de determinar la dosis optima de ambos reactivos para llevar a cabo un buen tratamiento y evitar sobre costes en el proceso. Inicialmente se debe conocer la concentración del DQO para determinar la dosis optimas de ambos reactivos, esto con el fin de obtener la cantidad de peróxido de hidrogeno por

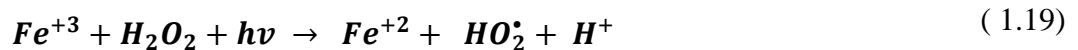
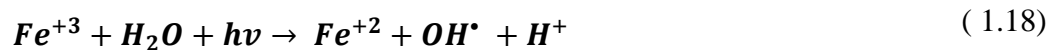
estequiometria (Ecuación ( 1.17), lo cual permitirá que se alcance la oxidación de la materia orgánica.



La reacción ( 1.17) establece la relación entre la oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica(DQO) y el agente oxidante. Esta relación está establecida en 1g de DQO=0.03125 mol O<sub>2</sub> = 0.0625 mol H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, según Ince & Tezcanli (1999).

### 1.2.13. Proceso foto-Fenton

De acuerdo a Ameta et al. (2018), el proceso foto-Fenton es el resultado de la combinación de peróxido de hidrógeno y radiación UV con un ion Fe<sup>+2</sup> o Fe<sup>+3</sup> para lograr producir más radical hidroxilo en comparación al tratamiento Fenton, esto trae consigo un incremento en la tasa de degradación de contaminantes orgánicos. La reacción de Fenton consume el Fe<sup>+2</sup> y acumula iones Fe<sup>+3</sup> en el sistema y la reacción se detiene cuando se consume todo el Fe<sup>+2</sup>. La regeneración fotoquímica de iones ferrosos es aportada por el proceso de foto-reducción de acuerdo a la reacción de foto-Fenton (ecuaciones ( 1.18) y ( 1.19). Los iones ferrosos regenerados reaccionan nuevamente con el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, continuando con la generación de radical hidroxilo y ion férrico, y de esta manera, el ciclo continúa:



Pilco & Gutierrez (2020), consideran que para alcanzar una mejor eficiencia en el proceso de foto-Fenton se debe considerar los siguientes factores: concentración inicial del DQO, el tiempo de contacto de reacción, la relación de peróxido de hidrogeno con el ion ferroso (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>+2</sup>), control del pH, potencia de la lámpara UV.

El seguimiento y control del pH en el proceso de foto-Fenton es importante, ya que esto influye en la especiación del peróxido de hidrogeno e hierro. El rango óptimo de pH es de 2 a 4 en este tipo de tratamiento, obteniéndose un mejor rendimiento a pH cercanos de 3.0, a este PH los complejos hidroxil-Fe<sup>+3</sup> son más solubles, además, el Fe(OH)<sup>+2</sup> es más fotoactivo. Se reporta que el proceso foto-Fenton presenta mayor eficiencia que el tratamiento Fenton.

#### 1.2.14. Normativa Ambiental para la calidad del agua.

La legislación medioambiental en el Perú, está regulada por MINAM, esta institución considera que los límites establecidos serán para cada caso/situación, estén factibles de ser logrados con los recursos que se cuentan para tal fin.

Los efluentes de los salones de belleza, al ser considerada este sector como una actividad comercial y a efectos de aplicación del decreto supremo N° 010-2019-VIVIENDA, donde se brindan los lineamientos para el control de parámetros de calidad de las descargas de aguas residuales que por lo general son vertidas en el sistema de alcantarillado sanitario mediante el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA).

Es necesario considerar a este sector en un análisis más profundo referente a las descargas que se emiten, pues a comparación de las actividades industriales y/o comerciales, las descargas en este sector puedan ser mínimas, existe el factor del uso de productos que en su mayoría contengan insumos peligrosos y tóxicos, a su vez se suma el crecimiento vertiginoso de salones de belleza en todos los ámbitos como áreas urbanas y rurales, comerciales y residenciales.

**Tabla 4**

*Anexo 01 de VMA para descargas al sistema de alcantarillado*

PARAMETRO	UNIDAD	SIMBOLOGIA	VMA PARA DESCARGAS AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	DBO <sub>5</sub>	500
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	DQO	1000
Solidos Suspendidos Totales	mg/L	SST	500
Aceites y Grasas	mg/L	A Y G	100

Nota: MVCS (2019)

##### 1.2.14.1. Valores Máximos Admisibles

Los valores máximos admisibles (VMA), concordante con MVCS (2019), “son aquellos valores donde se encuentran concentrados, elementos, sustancias o parámetros físicos y/ o químicos que caracterizan a un efluente no domestico que va descargar a la red de alcantarillado”, estos generaran daño inmediato o progresivo a las instalaciones, infraestructura sanitaria, así como los demás componentes del sistema de alcantarillado y procesos de tratamiento de aguas residuales.

## **1.2.15. Peróxido de hidrogeno**

### **1.2.15.1. Descripción general**

Descubierto por Louis Jacques Thérnard, en 1818, quien descubre que la reacción de peróxido de bario con ácido nítrico frío resulta en la producción de “agua oxigenada”. Es un compuesto químico, cuya fórmula empírica  $H_2O_2$ , tiene un olor dulce a altas concentraciones. Comercialmente se presenta en soluciones acuosas, con una apariencia similar al agua (tanto en estado líquido y sólido), es ligeramente más viscosa y densa que el agua por su más alto punto de ebullición.

El peróxido de hidrógeno y sus soluciones, son altamente reactivos en presencia de materiales oxidantes, con una capacidad de descomponerse en agua y oxígeno producto de una reacción exotérmica; de naturaleza altamente oxidante, en presencia de contaminantes y temperaturas altas su velocidad de descomposición es alta.

“A fines del siglo XX las organizaciones ambientales y sus legislaciones, promovieron ampliamente la protección del medio ambiente, enfocando sus esfuerzos en el alcance de una química verde”. Peña R. & Díaz B. (2020), manifiestan que razón a esto, el peróxido de hidrogeno tiene un gran potencial de uso, por esa razón se está usando de una manera innovadora y versátil para tratamiento de aguas residuales gracias a su alto potencial de oxidación de materia orgánica.

### **1.2.15.2. Características fisicoquímicas**

Líquido transparente e incoloro, es completamente miscible con el agua, y a concentraciones mayores a 65 % es soluble en solventes orgánicos como los ésteres carboxílicos. La separación del agua se realiza mediante destilación.

En la Tabla 5 se presenta las principales propiedades fisicoquímicas, además una comparación con respecto al agua.

**Tabla 5***“Propiedades físicas del peróxido de hidrógeno y el agua”*

Propiedad Física	Peróxido de hidrógeno	Agua
Punto de fusión (°C)	-0.43	0.00
Punto de ebullición (°C)	150.2	100.0
Calor de fusión (J/g)	368	334
Calor de vaporización (Jg-1K-1)25 °C	1519	2443
Calor específico (Jg-1K-1) líquido 25 °C	2.629	4.182
Densidad relativa (g cm-3) 25 °C	1.4425	0.9971
Viscosidad (mPas) 20 °C	1.249	1.002
Temperatura crítica (°C)	457	374.2
Presión crítica (Mpa)	20.99	21.44

Nota: Peña R. &amp; Díaz B. (2020 p. 64)

### 1.3.MARCOS CONCEPTUALES

*DQO*: Parámetro a medir para determinar la cantidad de componentes a ser oxidadas mediante tratamientos químicos.

*Turbidez*: Característica óptica de una muestra líquida, el cual se fundamenta en la dispersión de la luz, impidiendo ser transmitida a través de la suspensión.

*pH*: Parámetro para determinar el valor de cantidad de acidez o alcalinidad de una solución, por otro lado las alteraciones en estos niveles pueden ser generadas por agentes extraños.

*Radical Hidroxilo*: Forma neutra de ion hidroxilo. Los radicales hidroxilos son altamente reactivos (se convierten fácilmente en grupos hidroxilo) y, por consiguiente, son de corta duración.

*Peróxido de Hidrogeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)*: Es un compuesto que en su composición son acrecentadamente polares, por lo general se encuentra en presentaciones como un líquido viscoso y considerado como uno de los mejores oxidantes.

*Valores Máximo Admisible (VMA)*: Son los valores de concentración máxima permitida de parámetros fisicoquímicos concentrados en un efluente de usuarios no domésticos, con la finalidad de la conservación de las redes de alcantarillado sanitario.

## **2. CAPITULO II**

### **PARTE EXPERIMENTAL**

El presente capítulo detalla la metodología experimental de la realización de esta tesis, además describe de manera breve algunos equipos, presenta la lista de reactivos, materiales y describe los métodos de análisis, empleados para la realización de esta investigación. También presenta las diversas condiciones de experimentación planeadas para la eliminación de la materia orgánica en aguas residuales de salones de belleza, con la el objetivo de determinar la eficiencia del proceso foto-Fenton.

#### **2.1. Metodología**

##### **2.1.1. Materiales**

- Manguera de ½
- Soporte Universal con pinza
- Embudos
- Pipetas volumétricas (volumen exacto) y serológicas (volumen variado)
- Vasos de precipitación (250 mL, 500 mL y 1,000 mL)
- Propipetas
- Lunas se reloj
- Espátulas
- goteros
- Recipiente de 40 L
- Matraz de 250 mL
- Fiolas de 500 mL y 1,000 mL
- Varillas de agitar
- Bureta de 10 mL
- Tubos de digestión 16 x100 mm
- Filtros de 0.45 um

##### **2.1.2. Reactivos**

###### **2.1.2.1. Tratamiento foto Fenton**

- Sulfato Ferroso heptahidratado ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )
- Peróxido de hidrogeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )

- Ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 1 N
- Hidróxido de Sodio (NaOH) 1N
- Dióxido de manganeso

#### **2.1.2.2. Análisis DQO**

- Ftalato hidrogeno de potasio
- Dicromato de potasio
- Ácido sulfúrico concentrado
- Sulfato de plata
- Nitrato de mercurio
- Agua grado reactivo

#### **2.1.3. Equipos**

##### **2.1.3.1. Tratamiento foto-Fenton**

###### **2.1.3.1.1. Foto-Reactor de lámpara UV**

Para los ensayos del proceso foto-Fenton, se emplea lámpara de mercurio de baja presión, la cual está dentro de un tubo de cuarzo para separarlo y protegerlo de las aguas residuales, estos están rodeados por una carcasa construido por acero inoxidable, cuenta con entrada y salida para el efluente a tratar, y tiene una capacidad de 1.2 litros. La lámpara tiene una longitud de 25 cm de largo y 1.5 cm de diámetro con una potencia de 16 watts, este genera una radiación monocromática a una longitud de 254 nm; la carcasa tiene una longitud de 30 cm y 6 cm de diámetro.

El sistema también cuenta con un recipiente de almacenamiento, este tiene una bomba de recirculación sumergible para garantizar la turbulencia con ello la hogenización para proveer los radicales disuelto en la solución. En Figura 3 presenta un diagrama del sistema foto reactor.

###### **2.1.3.1.2. Balanza Analítica**

###### **2.1.3.1.3. Potenciómetro**

###### **2.1.3.1.4. Equipo de agitación magnético**

##### **2.1.3.2. Análisis de DQO**

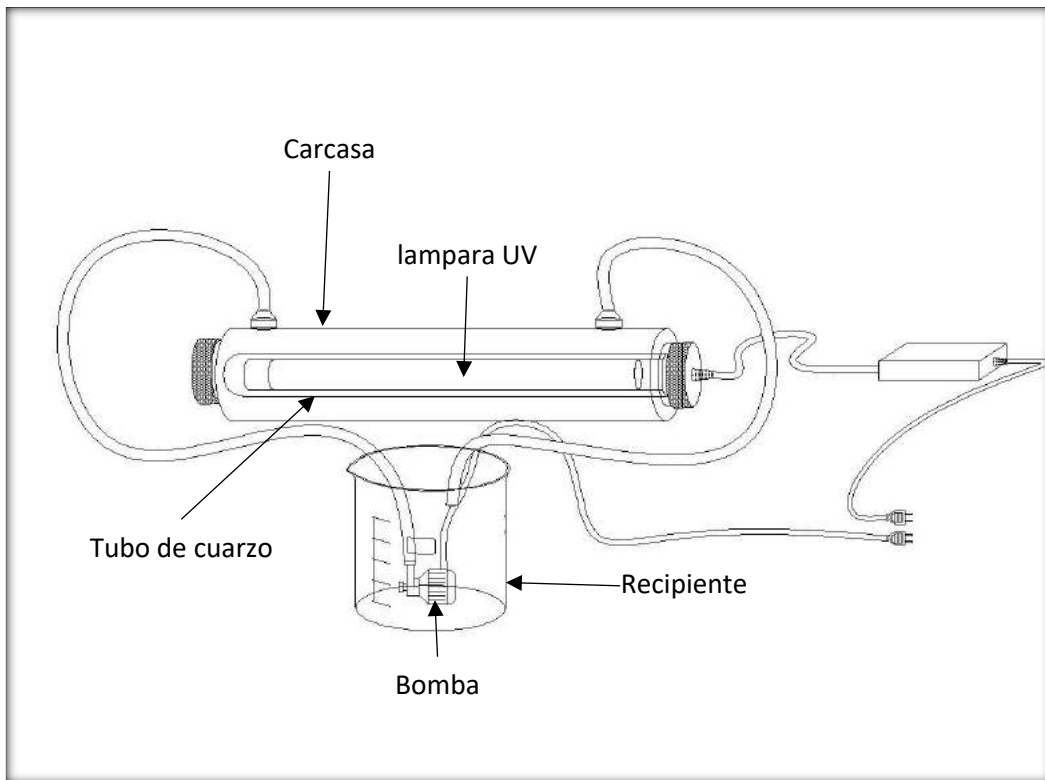
2.1.3.2.1. Bloque de calentamiento a 150 °C

2.1.3.2.2. Equipo espectrofotométrico

2.1.3.2.3. Balanza analítica

**Figura 3**

*Diagrama de tratamiento Foto-Fenton*



**Figura 4:**

*Sistema de tratamiento Foto Fenton*



## **2.2.Método**

### **2.2.1. Recolección y homogenización de la muestra**

Para el trabajo de investigación, se determinó como población las aguas generadas por las actividades realizadas en salones de belleza de la ciudad de Huancayo, y para el estudio las muestras son recolectadas en 3 momentos desde las 8:00 horas a las 20:00 horas, este es el horario de atención de estos centros de servicio. Se recolecta el agua residual de diferentes puntos donde están ubicados los salones de belleza, y luego este se homogeniza con agitación constante, haciendo un total de 32 litros.

### **2.2.2. Caracterización de las muestras antes de tratamiento**

La muestra de aguas residuales obtenidas es caracterizada mediante DBO<sub>5</sub>, DQO, aceites y grasas, sólidos suspendidos, y microbiológicamente; para el cual se envía a un laboratorio externo.

### **2.2.3. Metodología experimental para la determinación de Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

#### **2.2.3.1. Resumen**

El método empleado es una técnica colorimétrica, el cual consiste en que las muestras son calentadas en condiciones de reflujo cerrado (digestión), esta muestra es de volumen conocido, el cual posterior a ello es homogenizado, después se agrega una cantidad conocida de dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) en exceso y del reactivo de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). El calentamiento debe ser durante un período mínimo de dos horas, utilizando como catalizador el sulfato de plata ( $Ag_2SO_4$ ); durante este proceso toda materia orgánica, susceptible a ser oxidada, se oxida consumiendo el dicromato de color amarillo el cual es reemplazado por el ion crómico de color verdoso. Finalmente se determina por colorimetría la cantidad de ion crómico que se produce.

#### **2.2.3.2. Preparación de los reactivos**

##### **2.2.3.2.1. Solución de dicromato de potasio patrón, 0.0167M (solución digestora)**

El dicromato de potasio tiene la función de oxidar a la materia orgánica, durante esta oxidación de la materia orgánica presente hace que el cromo hexavalente ( $Cr^{6+}$ ) cambio de estado a cromo trivalente ( $Cr^{+3}$ ), este cambio de estado hace que el color del medio cambie de amarillo-anaranjado a verde-celeste.

#### **2.2.3.2.1.1. Protocolo experimental**

- El dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) de calidad estándar primaria se seca a  $103\text{ }^\circ\text{C}$  durante 2 horas.
- Pesar 4.913 g de  $K_2Cr_2O_7$ , y disolver en 500 mL de agua grado reactivo,
- Agregar 167 ml de  $H_2SO_4$  (conc), además 33.3 g de  $HgSO_4$ .
- Disolver, enfriar y diluir hasta un volumen final de 1,000 mL.

#### **2.2.3.2.2. Reactivo ácido sulfúrico**

La materia orgánica en su mayoría puede ser oxidada por una mezcla a los ácidos crómicos y sulfúrico a temperatura de ebullición, a condiciones ácidas dada por el ácido sulfúrico. Sin embargo, los compuestos alifáticos volátiles de cadena lineal no son posibles de oxidar en cantidad apreciable, bajo estas condiciones, por lo que es necesario agregar  $Ag_2SO_4$  como catalizador.

#### **2.2.3.2.2.1. Protocolo experimental**

- Agregar  $Ag_2SO_4$ , de calidad, a  $H_2SO_4$  concentrado a una proporción de 5.5 g de  $Ag_2SO_4$ /kg de  $H_2SO_4$ .
- Dejar agitando por un día para disolver  $Ag_2SO_4$ .

#### **2.2.3.2.3. Ftalato de hidrógeno de potasio (FHP) patrón**

El ftalato cuenta con una DQO teórica de 1.176 mg  $O_2$ /mg, por lo que se puede usar esta sal como patrón para la construcción de la curva.

#### **2.2.3.2.3.1. Protocolo experimental**

- Secar el ftalato de hidrógeno de potasio ( $HOOC C_6H_4 COOK$ ) hasta alcanzar peso constante a  $120\text{ }^\circ\text{C}$ . Disolver 0.4252 g en 500 mL de agua grado reactivo. El FHP tiene una demanda química teórica de 1.176 mg  $O_2$ /mg y por consecuencia esta solución tiene un ROQ teórico de 1000  $\mu\text{g } O_2$ /mL.

#### **2.2.4. Preparación de la curva de calibración**

Una curva de calibración es la representación gráfica y matemática de la relación de una señal instrumental (para este caso la absorbancia a 600 nm) en función de la concentración de un analito compuesto (la demanda química de oxígeno), el cual nos sirve para determinar la

concentración del analito en una muestra, a partir de la señal instrumental, mediante la representación matemática.

#### 2.2.4.1. Protocolo experimental

- La curva de calibración se realiza a partir de los estándares de calibración previamente preparados o llamados también patrones de curva.
- La curva de calibración debe tener un alcances de 20 mg O<sub>2</sub>/L a 900 mg O<sub>2</sub>/L para la DQO colorimétrico (APHA et al., 1992), preparado a partir de la solución patrón (utilice la ecuación ( 2.1), para determinar el volumen a tomar para cada punto de la curva). Estos patrones se digestan como se detalla en la siguiente en la siguiente sección.
- Por último, se lee la absorbancia en un espectrofotómetro, a una longitud de onda de 600 nm. Antes de leer los estándares de curva, se ajusta el instrumento a cero de absorbancia (auto zero) con el estándar que no contiene materia orgánica sin digestar (blanco).

$$V_{patron} = \frac{DQO_{curva}}{DQO_{Patron}} V_{fiola} \quad (2.1)$$

Donde:

$V_{patron}$ : Volumen del patrón a tomar (mL)

$V_{fiola}$ : Volumen de la fiola en la se está preparando la curva (mL)

$DQO_{Patron}$ : Demanda química del patrón (1000 mg/L)

$DQO_{curva}$ : Demanda química del punto de la curva (20-900 mg/L)

Con los datos obtenidos se elabora una gráfica de Concentración de DQO en contra la absorbancia y la ecuación.

$$Abs = a * DQO + b \quad (2.2)$$

Donde:

$Abs$ : Absorbancia de los patrones a 600 nm

$DQO$ : Demanda química de oxígeno teórico de las soluciones patrones (mg/L)

$a$ : Pendiente de la curva

$b$ : Punto de intersección de la curva

#### 2.2.5. Procedimiento de análisis de muestras

El procedimiento para la determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) de las muestras a analizar es el método detallado en “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (APHA et al., 1992).

### 2.2.5.1. Protocolo experimental

- Realizar la digestión de la muestra con un volumen conocido, con dicromato potásico ( $K_2Cr_2O_7$ ), con un medio fuertemente ácido ( $H_2SO_4$ ),
- posteriormente se lee las absorbancias a  $\lambda = 600$  nm y se calcula el DQO a con la curva de calibración elaborada.
- Además del dicromato potásico y del ácido sulfúrico, se requiere adicionar sulfato de plata, que tiene la función de catalizar la oxidación y acomplejar los interferentes (los cloruros, bromuros y yoduros se consideran interferentes para este procedimiento).
- Para la digestión se utiliza tubos de digestión 16 \*100 mm, a donde se adicionan 2.5 mL de muestra, además de 1.5 mL de solución digestora, 3.5 mL de solución de ácido sulfúrico hasta completar a un volumen global de 7.5 mL (también se puede usar otras alternativas, se sugiere revisar la sección 5220 C propuestos por el “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”, se digesta a 150 °C por dos horas, posteriormente se deja a temperatura ambiente de 10 a 15 minutos para dar lectura a las absorbancias a una longitud de onda de 600 nm.

#### NOTA 1:

Antes de dar lectura a las muestras es importante ajustar el instrumento a cero de absorbancia con ayuda del blanco sin digerir.

A partir de las absorbancias obtenidas se determina la DQO con la ecuación obtenida.

#### NOTA 2:

Con este método se pueden medir hasta 900 mg/L de DQO; por tanto, para muestras que contengan mayor DQO deben diluirse convenientemente. El DQO será mayor a 900, cuando la absorbancia obtenida es mayor a la absorbancia del patrón de curva más alto (900 mg/L). En estos casos para obtener el resultado final, al resultado obtenido a partir de la muestra diluida se multiplica por el factor de dilución, donde el factor de dilución ( $f_{Dilución}$ ) se obtiene con la ecuación ( 2.3).

$$f_{Dilución} = \frac{V_{muestra}}{V_{final}} \quad (2.3)$$

Donde:

$f_{Dilución}$ : Factor de dilución

$V_{muestra}$ : Volumen de la muestra tomado para la dilución (mL)

$V_{final}$ : Volumen final de la solución (mL)

## **2.2.6. Metodología experimental de foto-Fenton**

### **2.2.6.1. Tratamiento Foto-Fenton**

#### **2.2.6.1.1. Protocolo experimental**

- A la muestra a tratar se ajustó el pH a 3.0, 5.0 y por último se realiza un experimento sin manipular el pH; para el ajuste de pH se utiliza una solución de ácido sulfúrico de 1 N., el cual se añade a la muestra y luego se recircula por todo el sistema durante 5 minutos para homogenizar, transcurrido el tiempo se comprueba que el pH esté correctamente ajustado.
- Con el pH ajustado correctamente, se añade al recipiente la sal de hierro necesario en cada caso, en forma de sulfato ferroso heptahidratado ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ),
- Luego se recircula nuevamente por 5 minutos para homogenizar.
- El último reactivo que se adiciona al sistema fue el  $\text{H}_2\text{O}_2$  necesario para cada caso, la alimentación se realiza en dos etapas: el primero al inicio del tratamiento, el segundo a media hora después de iniciar el tratamiento.
- Después de agregar el peróxido de hidrógeno, se enciende de manera inmediata la lámpara dando inicio así a la reacción foto-Fenton. El tratamiento duró un tiempo total de 60 minutos.

#### **2.2.6.2. Neutralización y eliminación de peróxido de hidrógeno residual**

El  $\text{Fe}^{2+}$  sin reaccionar y el  $\text{H}_2\text{O}_2$  residual pueden ser interferentes para el análisis de DQO (contribuyen de manera positiva al valor DQO, según, Sevimli et al., 2014), ya que reaccionan con el dicromato de potasio; para inhibir la interferencia del  $\text{Fe}^{2+}$  se realiza la eliminación mediante la formación  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Para la eliminación del peróxido de hidrógeno residual se utiliza  $\text{MnO}_2$ , este último es capaz de descomponer el peróxido de hidrógeno en agua y oxígeno como catalizador como lo menciona, Silva A. et al. (2009).

#### **Protocolo experimental**

- Se ajusta el pH a aproximadamente 7.5 con la adición de NaOH 1N.
- Se mezcló durante 5 min a 30 rpm para formar flóculos de hidróxido de hierro ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ )
- Se deja reposar para sedimentar los lodos de hierro formado.
- Se toma 25 mL del sobrenadante formado después de la neutralización, se le agrega 0.5 g de  $\text{MnO}_2$  y se agita por 15 minutos.

#### **2.2.7. Filtración**

La filtración se realiza con el fin de eliminar el  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  y  $\text{MnO}_2$ .

### 2.2.7.1. Protocolo experimental

- Las muestras se filtran a través de membranas de 0.45  $\mu\text{m}$ , para el posterior análisis de DQO mediante el método descrito en la sección 2.2.3.

### 2.2.8. Volumen de peróxido de hidrogeno requerido

Ince & Tezcanli, (1999), propusieron que para calcular la cantidad de peróxido de hidrogeno estequiométrico necesario para tratar 1 gramo de Demanda Química de Oxígeno (DQO), de la siguiente manera:

#### Cálculos

$$\begin{aligned} 1 \text{ gDQO} &= 1 \text{ gO}_2 \frac{1 \text{ molO}_2}{32 \text{ gO}_2} = 0.03125 \text{ molO}_2 \frac{2 \text{ molH}_2\text{O}_2}{1 \text{ mol O}_2} = 0.0625 \text{ molH}_2\text{O}_2 \\ &= 0.0625 \text{ molH}_2\text{O}_2 \frac{34.0147 \text{ g H}_2\text{O}_2}{1 \text{ molH}_2\text{O}_2} = 2.126 \text{ g H}_2\text{O}_2 \end{aligned}$$

Por lo que, 1 gramo de DQO requiere estequiométricamente 2.126 g  $\text{H}_2\text{O}_2$

**1 mol  $\text{O}_2$** : son las moles de oxígeno que se genera a partir de 2 moles de peróxido de oxígeno, de acuerdo de la ecuación ( 1.17) de descomposición de peróxido de hidrógeno.

Por lo descrito, la cantidad de peróxido de hidrogeno estequiométrico necesario:

$$\text{Masa H}_2\text{O}_2(\text{estq}) = \text{DQO} * \text{Volumen H}_2\text{O} * 2.126 \quad (2.4)$$

Donde:

**Masa  $\text{H}_2\text{O}_2$  (est)**: Masa del peróxido estequiométrico necesario (g)

**DQO**: Demanda química de oxígeno del agua a tratar (g)

**Volumen  $\text{H}_2\text{O}$** : Volumen de  $\text{H}_2\text{O}$  residual a tratar (L)

El peróxido de hidrogeno están mezclados con agua, por lo que no se encuentran al 100 %, por lo que para determinar la cantidad de peróxido de hidrogeno necesario a una concentración dada, se determina de la siguiente manera:

$$\text{Masa H}_2\text{O}_2(\text{necesario}) = \text{Masa H}_2\text{O}_2(\text{est}) * \frac{100}{\% \left(\frac{\text{p}}{\text{p}}\right) \text{H}_2\text{O}_2}$$

Reemplazando la ecuación ( 2.4), se obtiene:

$$\text{Masa H}_2\text{O}_2(\text{necesario}) = \text{DQO} * \text{Volumen H}_2\text{O} * 2.126 * \frac{100}{\% \left(\frac{\text{p}}{\text{p}}\right) \text{H}_2\text{O}_2} \quad (2.5)$$

Donde:

**$\%(\text{p}/\text{p}) \text{H}_2\text{O}_2$** : Concentración de peróxido de hidrógeno

El peróxido de hidrogeno está en fase líquida, por lo que las adecuadas mediciones se harán en volumen, por lo que es conveniente convertir la masa a volumen.

$$Volumen H_2O_2(necesario) = \frac{\left( DQO * Volumen H_2O * 2.126 * \frac{100}{\% \left( \frac{p}{p} \right) H_2O_2} \right)}{\rho H_2O_2} \quad (2.6)$$

Donde:

**Volumen H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(necesario):** Volumen de peróxido hidrógeno necesario (mL)

**ρ<sub>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></sub>:** Densidad del peróxido de hidrógeno

En la Tabla 6, se presentan los datos necesarios para los cálculos.

**Tabla 6**

*Parámetros para el cálculo de cantidad de peróxido estequiométrico para un tratamiento Fenton*

Parámetro	Cantidad
DQO (g/L)	*
Volumen de agua a tratar (L)	*
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> estequiométrico necesario por 1g DQO (g)	2.125
Concentración de peróxido (% p/p)	30 **
Densidad de peróxido (g/ml)	1.11 **

\*Son valores propios de cada experimento.

\*\*Los datos son de las especificaciones técnicas las fichas técnicas de los reactivos

### 2.2.9. Cálculo de sulfato ferroso heptahidratado necesario para cada experimento

En la bibliografía se reporta que la relación H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>2+</sup> no debe ser mayor a 10 (por cada 10 gramos H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, el Fe<sup>2+</sup> debe ser menor o igual a 1 gramo), en el presente trabajo se optó por agregar por cada 10 gramos de oxidante 0.5 gramos de catalizador; por lo tanto, la cantidad necesario de sal se determina de la siguiente manera.

#### Cálculos

$$W_{FeSO_4 \cdot 7H_2O} = Masa_{H_2O_2(estq)} * \frac{0.5 g Fe^{+2}}{10 g H_2O_2} * \frac{278.05 g FeSO_4 \cdot 7H_2O}{55.8 g Fe^{+2}}$$

Donde:

**W<sub>FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O</sub>:** Masa del **FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O** (g) **278.05:** Peso molecular del **FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O** (g/mol)

$\frac{1 g Fe^{+2}}{10 g H_2O_2}$ : Proporción en masa de los reactivos

Con los datos se obtiene:

$$W_{FeSO_4 \cdot 7H_2O} = Masa_{H_2O_2} \cdot \frac{M_{FeSO_4 \cdot 7H_2O}}{M_{H_2O_2}} * 0.2491 \quad (2.7)$$

### 2.2.10. Cálculo de porcentaje de DQO removido

$$\%DQO_{Removido} = \left( \frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} \right) * 100 \quad (2.8)$$

**Donde:**

$DQO_i$ : Demanda química de oxígeno antes de tratamiento (mg/L)

$DQO_f$ : Demanda química de oxígeno después del tratamiento (mg/L)

$\%DQO_{Removido}$ : Porcentaje de demanda química de oxígeno removido durante el tratamiento (%)

### 2.2.11. Diseño de investigación

Para alcanzar los objetivos planteados en el presente trabajo, se propone un Diseño Factorial mixto de 2 X 3, que se detalla a continuación:

- Variables dependientes  
Reducción de Demanda Química de Oxígeno (mg/L)
- Variables independientes  
Potencial de hidrógeno: 2 niveles  
Cantidad de peróxido de oxígeno: 3 niveles

Los niveles de la variable independiente se detallan en la Tabla 7; además las variables que se mantendrán constantes, ya que no son el objeto de estudio del presente trabajo, son:

- Tiempo de tratamiento: 1 hora
- $Fe^{+2}/H_2O_2=0.05$
- Temperatura: 20 °C (Temperatura del lugar de estudio)
- Potencia de luz UV: 16 watts

**Tabla 7***Variables independientes y los niveles*

Variables independientes	Niveles		
	Bajo	Medio	Alto
Cantidad de Peróxido Requerido	50 % del estequiométrico requerido	70 % del estequiométrico requerido	100 % del estequiométrico requerido
Potencial de Hidrógeno	3	-	5

### 3. CAPITULO III

#### TRATAMIENTO DE DATOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección de la investigación se presentan y se precisan los resultados alcanzados en la parte experimental de la degradación de la materia orgánica contenidas en las aguas residuales de salones de belleza y posteriormente se exponen las interpretaciones estadísticas de la relación causa-efecto.

#### 3.1. Tratamiento de datos

##### 3.1.1. Reactivos utilizados

**Tabla 8**

*Especificación de reactivos utilizados*

Reactivo	Formula molecular	Peso molecular (g/mol)	Grado/ %Pureza	Marca	Empresa proveedora
Peróxido de hidrógeno	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	34.01	ACS, ISO/ 30 p/p	Scharlau	Laboratory Products L&A
Sulfato ferroso hepta-hidratado	FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	278.02	ACS/ 99.0-104.5	Baker	Laboratory Products L&A
Dicromato de potasio	K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	294.19	p. a. Emsure, ACS/ ≥99.9	Merck	Laboratory Products L&A
Ácido sulfúrico	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	98.08	Hi-Ar/ 98	Himedia	Laboratory Products L&A
Ftalato de hidrógeno potasio	C <sub>8</sub> H <sub>5</sub> KO <sub>4</sub>	204.22	BioXtra/ ≥99.95	Sigma Aldrich	Laboratory Products L&A
Sulfato de plata	Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	311.8	ACS/≥98.5	Merck	Laboratory Products L&A
Nitrato de mercurio monohidratado	HgN <sub>2</sub> O <sub>6</sub> .H <sub>2</sub> O	342.62	p.a., ACS/ ≥98.5	Sigma Aldrich	Laboratory Products L&A
Dióxido de magnesio	MnO <sub>2</sub>	86.94	Hi-AR/99.0-102	Himedia	Laboratory Products L&A
Hidróxido de sodio	NaOH	40.0	AR/ 97-100.5	Sigma Aldrich	Laboratory Products L&A

### 3.1.2. Características fisicoquímicas y microbiológicas de las aguas residuales de los salones de belleza

Las características fisicoquímicas y microbiológicas obtenidas en un laboratorio externo para las aguas residuales de salones de belleza, se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 9**

*Características fisicoquímicas y microbiológicas de los residuos líquidos de los salones de belleza*

PARÁMETRO	REFERENCIA	UNIDAD	RESULTADO
Sólidos Totales en Suspensión	EW_APHA2540D	mg Sólidos Totales en suspensión/L	1 480
Demanda Bioquímica de Oxígeno	EW_APHA5210B	mg/L	1 041.3
Demanda Química de Oxígeno	EW_APHA5220D	mg O <sub>2</sub> /L	7 385.6
Aceites y Grasas	EW_ASTMD3921	mg/L	614.6
<b>Análisis Microbiológicos</b>			
Numeración de Coliformes totales	EW_APHA9221B_CX	NMP/100 mL	23.0
Numeración de Escherichia coli	EW_APHA9221F_CX	NMP/100 mL	<1.8

Además, los resultados obtenidos en el laboratorio, se muestran continuación.

**Tabla 10**

*Valores de DQO y pH obtenido en laboratorio*

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO
Demanda Química de Oxígeno	mg O <sub>2</sub> /L	7 264.6
Potencial de Hidrógeno	pH	8.37

### 3.1.3. Requerimiento teórico de peróxido de hidrógeno

De acuerdo al procedimiento descrito en la sección 2.2.8, con la ecuaciones ( 2.4) y ( 2.7) se obtiene:

$$\text{Masa } H_2O_2(\text{estq}) = 16.70 \text{ g } H_2O_2$$

$$\text{Volumen } H_2O_2(\text{necesario}) = 55.66 \text{ mL } H_2O_2$$

### 3.1.4. Masa de Fe<sup>+2</sup> requerido

Con el procedimiento descrito en la sección 2.2.9 se obtiene, y la ecuación ( 2.8).

$$WFeSO_4 \cdot 7H_2O = 4.6176 \text{ g}$$

### 3.1.5. Condiciones de experimentos de las variables independientes

Las condiciones de las variables independientes, de acuerdo a los caculos previos realizados, son:

**Tabla 11**

*Valores de las variables independientes*

Variables independientes	Niveles		
	Alto	Medio	Bajo
Cantidad de Peróxido de hidrógeno (gramos)	16.697	11.688	8.349
Potencial de Hidrógeno	3	-	5

### 3.1.6. Curva de calibración del DQO

Con el procedimiento descrito en la sección 2.2.3, para la construcción de la curva de calibración se obtienen los datos de la Tabla 12.

**Tabla 12**

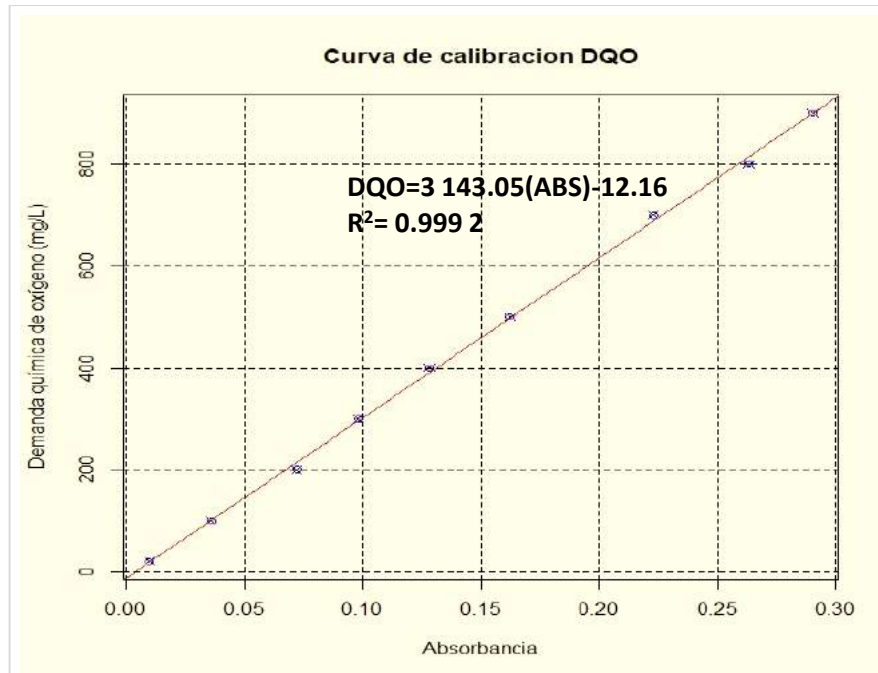
*Puntos de curva de calibración para el análisis de DQO*

Nº	DQO (ug/L)	Absorbancia ( $\lambda=600$ nm)
1	20	0.01
2	100	0.036
3	200	0.072
4	300	0.098
5	400	0.128
6	500	0.162
7	700	0.223
8	800	0.263
9	900	0.29

Con los datos de la Tabla 12 se obtiene el siguiente resultado:

**Figura 5**

*Curva de calibración de análisis DQO*



Con los datos obtenidos en la curva de calibración, se realiza una regresión lineal, con el cual se obtiene la ecuación:

$$DQO = 3\ 143.05 \times ABS - 12.16 \quad (3.1)$$

Donde:

**DQO**: Demanda química de oxígeno (mg/L)

**ABS**: Absorbancia a  $\lambda=600$  nm

La validación de la curva de calibración se encuentra en el **Anexo 3**.

### 3.1.7. Demanda Química de Oxígeno de los residuos líquidos de los salones de belleza

Con el procedimiento descrito en la sección 2.2.3, se obtiene: (ver cálculo se **Anexo 2**).

**Tabla 13:**

*Resultado de DQO de los residuos líquidos de los salones de belleza*

Antes de tratamiento	Absorbancia ( $\lambda = 600$ nm)	Factor dilución	DQO (mg/L)
Replica I	0.236	10	7 296.1
Replica 2	0.234	10	7 233.2
Promedio			<b>7 264.6</b>

### 3.1.8. Determinación de las condiciones óptimas para el tratamiento de aguas residuales, mediante el tratamiento foto-Fenton

En la Tabla 14 se observa la absorbancia obtenida para la determinación de DQO y el DQO calculado, para las muestras posterior al del tratamiento Foto-Fenton bajo las condiciones establecidas.

**Tabla 14**

*Absorbancias obtenidas después del tratamiento Foto-Fenton*

Variable		Variable Codificada		Absorbancia	
Potencial de Hidrógeno (pH)	Cantidad Peróxido (g)	Potencial de hidrógeno (pH)	Cantidad Peróxido Requerido	Replica I	Replica II
3	16.697	3	100 %	0.177	0.169
3	11.688	3	70 %	0.162	0.165
3	8.349	3	50 %	0.157	0.163
5	16.697	5	100 %	0.204	0.209
5	11.688	5	70 %	0.283	0.274
5	8.349	5	50 %	0.183	0.186

Con los resultados de la Tabla 14, se establece los valores de la Demanda Química de Oxígeno con la ecuación ( 3.1), los resultados se muestran en la Tabla 15.

**Tabla 15**

*Demanda química de oxígeno de las muestras tratadas por foto-Fenton*

Variable Codificada		Absorbancia		Factor de dilución		DQO (mg/L)	
Potencial de hidrógeno (pH)	Cantidad Peróxido Requerido	Replica I	Replica II	Replica I	Replica II	Replica I	Replica II
3	100 %	0.177	0.169	1	1	544.17	519.02
3	70 %	0.162	0.165	1	1	497.02	506.45
3	50 %	0.157	0.163	1	1	481.30	500.16
5	100 %	0.204	0.209	1	1	629.03	644.74
5	70 %	0.283	0.274	1	1	877.33	849.04
5	50 %	0.183	0.186	2	2	1 126.05	1 144.91

Con los resultados de la Tabla 15, se obtienen el porcentaje de reducción de la Demanda Química de Oxígeno, los resultados se muestran en la **Tabla 16**

### 3.1.9. Porcentaje de reducción del DQO mediante el tratamiento foto-Fenton

**Tabla 16**

*Reducción de DQO mediante tratamiento Foto-Fenton*

Variable Codificada		DQO (mg/L)		Reducción de DQO	
Potencial de hidrógeno (pH)	Cantidad Peróxido requerido	Replica I	Replica II	Replica I	Replica II
3	100 %	544.17	519.02	92.51 %	92.86 %
3	70 %	497.02	506.45	93.16 %	93.03 %
3	50 %	481.30	500.16	93.37 %	93.12 %
5	100 %	629.03	644.74	91.34 %	91.12 %
5	70 %	877.33	849.04	87.92 %	88.31 %
5	50 %	1126.05	1144.91	84.50 %	84.24 %

## 3.2. Discusión de resultados

### 3.2.1. Caracterización fisicoquímica de las muestras

Las características fisicoquímicas obtenidas se muestran en la Tabla 9. Los resultados muestran que las aguas residuales generadas por los salones de belleza presentan altas cargas de contaminantes orgánicos, que se ven reflejados en los de DQO, DBO<sub>5</sub>, sólidos suspendidos, aceite y grasa, que se muestran en la Tabla 9. Estos valores obtenidos superan los valores máximos permisibles para el rubro a la que pertenecen (“La Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria” clasifica a esta actividad por la clase CIU 9602, que son para las actividades comerciales), estos valores máximos admisibles están especificados en **la Tabla 4**.

Un parámetro muy común para evaluar el índice de biodegradabilidad de los efluentes líquidos es la relación DBO<sub>5</sub>/DQO; la Tabla 17 especifica los criterios que se deben tener en cuenta para determinar la característica biodegradable de los vertimientos líquidos; el valor DBO<sub>5</sub>/DQO resulta 0.14, este resultado indica que este tipo de aguas son no biodegradables de acuerdo a los criterios determinados en la Tabla 17, por lo que los tratamientos biológicos y también llamados convencionales no serán efectivos para la **reducción de los contaminantes orgánicos** y se deben optar por otro tipo de tratamientos no biológicos para reducir el DQO.

**Tabla 17***Criterios de biodegradabilidad según la relación DBO<sub>5</sub>/DQO*

<b>DBO<sub>5</sub>/DQO</b>	<b>Carácter</b>
>0.8	Muy biodegradable
0.7-0.8	Biodegradable
0.3-0.7	Poco biodegradable
<0.3	No biodegradable

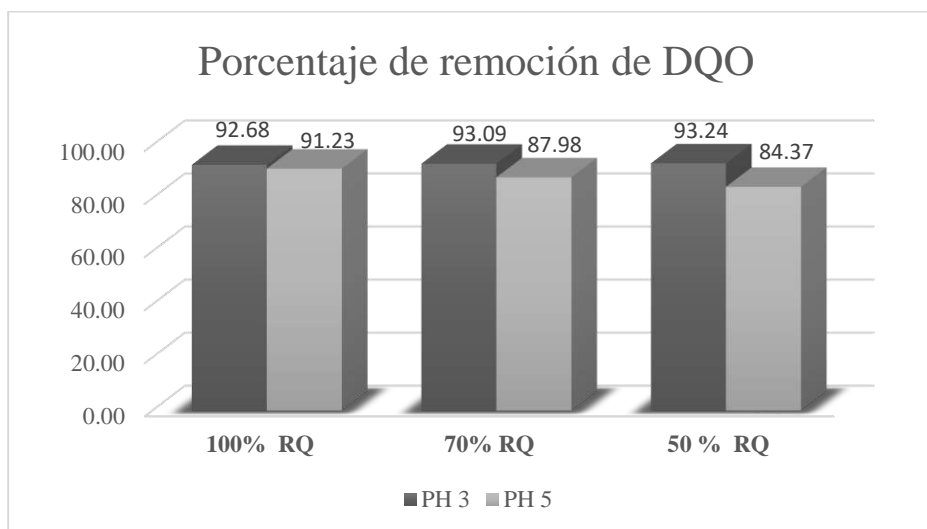
Nota: Nelly Ardila Arias et al. (1990)

### 3.2.2. Evaluación de la influencia del pH en la remoción de DQO

El pH es un parámetro que tiene mucha influencia sobre la eficiencia el proceso Fenton, los resultados obtenidos en la presente investigación manifiestan que también tienen gran influencia en el tratamiento foto-Fenton. En la Figura 5 se visualiza que el valor de pH 3 se obtuvo mayor remoción de DQO para los diferentes niveles de cantidad de peróxido de hidrógeno (al 50 %, 70 % y 100 % de la cantidad de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> estequiométrico con respecto a la DQO (en una relación 2.125 g de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/g de DQO); la mejor remoción se obtuvo a pH 3 y 50 % del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> requerido, con una remoción del 93.24 % del DQO inicial; y por otro lado la menor remoción se obtuvo a pH 5 y 50 % del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> requerido estequiométrico, con una remoción de 84.37 %; estos resultados concuerdan con lo obtenido por muchos autores en tratamiento Fenton. El efecto del pH se puede explicar por el estado de oxidación en la que se encuentra el catalizador (Fe), este determina la disponibilidad del catalizador y la reacción que ocurrirá para generar los radicales OH<sup>•</sup> (ver ecuación ( 1.1)), el cual elimina la materia orgánica. En la literatura se establece que el pH óptimo para el tratamiento Fenton es 3, aunque otros autores reportaron que se obtienen mejores resultados a pH 2.8; a medida que el pH va aumentando, se forma una mayor cantidad de Fe<sup>+3</sup> el cual precipita en forma de Fe(OH)<sub>3</sub>, que reduce la disponibilidad del catalizador, y además descompone el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O consumiendo los radicales OH<sup>•</sup> (Pliego Rodriguez, 2012), mediante una serie de reacciones en cadena (ver ecuación ( 1.2)y ( 1.9)), esto disminuye la eficiencia de tratamiento del proceso Fenton, lo cual se refleja en los resultados obtenidos.

**Figura 5**

*Remoción de DQO a pH 3 y pH 5*



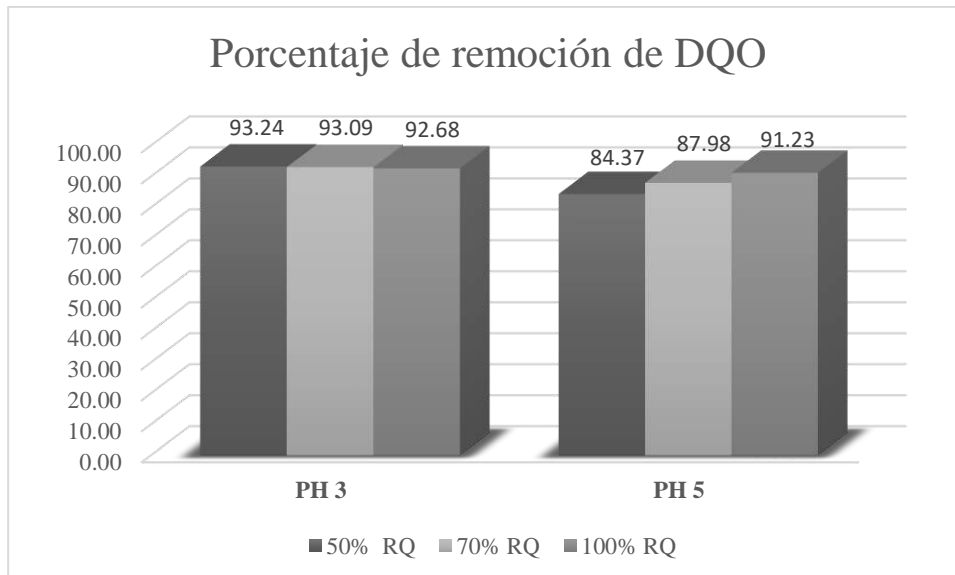
### 3.2.3. Evaluación de la influencia de la cantidad de peróxido de hidrógeno en la remoción de DQO

La cantidad de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, es otro factor transcendental en los procesos de tratamiento foto-Fenton; la eficiencia incrementa al incrementar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; sin embargo, el exceso de la dosis del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> puede reducir la eficiencia y además subir los costes de operación. La Figura 6, muestra que a pH 3 hay una diferencia mínima en la remoción de DQO; no obstante, no se puede afirmar que hay una mejor remoción en algunos de los casos, como se va demostrar más adelante en la prueba de hipótesis.

Se esperaba que a mayor cantidad de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, se logre mayor remoción de DQO; sin embargo, no ocurre esto. Un incremento en exceso de cantidad de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, favorece en las diversas reacciones generadas y competitivas, así mismo indicar que los radicales no generan reacción alguna con la materia orgánica (ver ecuación ( 1.4)( 1.9)( 1.10)( 1.11)), y una de estas reacciones es la reacción entre dos radicales OH para generar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Por otra parte, con un tratamiento foto-Fenton se esperaba una remoción máxima de 50 % y 70 %, para cuando se dosificó el 50 % y 70 % de la cantidad de peróxido de hidrógeno requerido, respetivamente; no obstante, se logró mayores porcentajes de remoción. Estas mayores remociones, se logra gracias a las reacciones que ocurre con la incorporación de la luz UV (reacciones Foto-Fenton), donde ocurre la generación adicional de los radicales OH<sup>•</sup> (ver ecuaciones ( 1.18)y ( 1.19))) durante la regeneración del catalizador.

**Figura 6**

*Remoción de DQO a diferentes cantidades de peróxido de hidrogeno.*



#### **3.2.4. Variación del pH a través del tiempo de tratamiento**

Se registró la variación del pH a medida que avanzaba el tratamiento foto-Fenton durante los primeros 60 minutos; la muestra presentaba un pH inicial de 8.47, después de agregar el sulfato ferroso, en todos los casos tiende a acidificarse (ver Tabla 18), esto se debe a la debido a la hidrólisis del ion  $Fe^{+2}$ , a mayor cantidad de sulfato ferroso agregado, es más ácido el medio. La Figura 7 muestra que conforme el tratamiento avanza, el valor del pH va disminuyendo hasta alcanzar valores menores a 3 (fuertemente ácido); el aumento de la acidez puede deberse a que durante el tratamiento ocurre las reacciones ( 1.2), ( 1.5), ( 1.6), ( 1.7) y ( 1.8) que aportan cationes hidrógeno ( $H^+$ ); sin embargo se puede suponer que las reacciones( 1.1), ( 1.3) y ( 1.14) pueden neutralizar la acción de lo  $H^+$  ya que aportan aniones hidroxilos ( $OH^-$ ); pero esto no ocurre debido los cationes  $H^+$  se generan a mayor velocidad que los aniones  $OH^-$  (ver Tabla 3). Este fenómeno es muy favorable para el tratamiento foto-Fenton, porque a pH ácido se obtienen óptimos resultados y es to supondría que ya no es necesario agregar soluciones para acidificar durante un tratamiento foto-Fenton reduciendo los costos operacionales. Otro resultado a destacar es que se logra remociones de DQO 94.59 % (Tabla 18). Este resultado es mayor al logrado a la mejor condición del diseño experimental (pH 3), esto podría suponer a pH menores

a 3, se obtiene mejores resultados, como reportan algunos autores, ya que durante la operación se logró alcanzar para el mejor caso hasta un pH menor a 2.5.

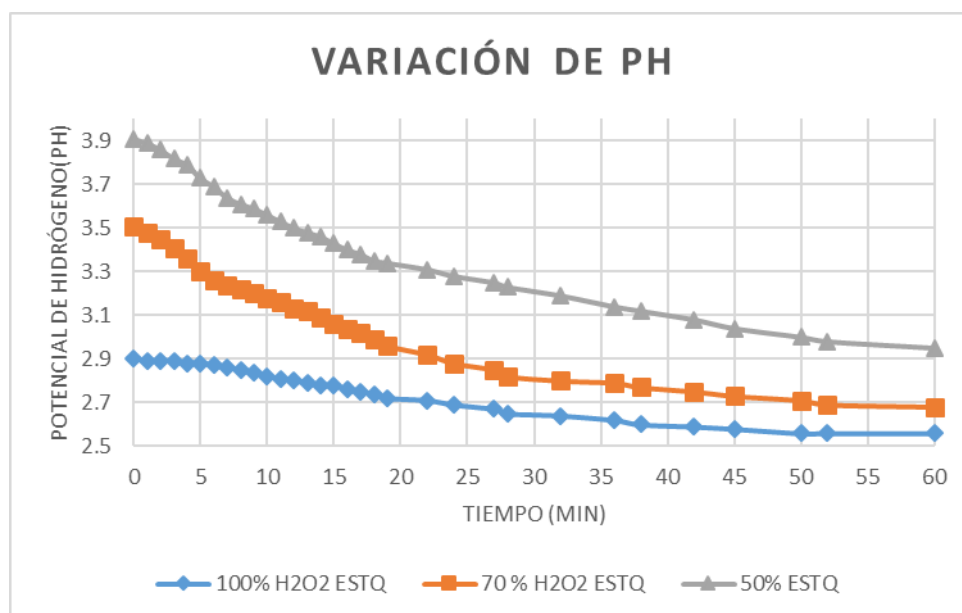
**Tabla 18**

*pH inicial y final a diferentes cantidades de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>*

H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	pH Inicial	Masa adicionado del FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	pH al adicionar FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	pH Final	DQO final (mg/L)	% DQO removido
100 % REQ	8.47	4.617 6 g	2.9	2.56	390.16	94.59%
70 % REQ	8.47	3.232 3 g	3.51	2.68	778.32	89.24%
50 % REQ	8.47	2.308 8 g	3.91	2.95	918.61	87.31%

**Figura 7**

*Comportamiento de pH en función del tiempo a diferentes condiciones de experimentación*



**Nota:**

100 % H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ESTQ: 100 % de masa de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> estequiométrico requerido

### 3.2.5. Contrastación de hipótesis

Para contrastar las hipótesis del trabajo de investigación, se realiza mediante el análisis de varianza de las variables independientes y su interacción, para el cual deben cumplir con los supuestos del modelo. El procedimiento y sus discusiones se detalla a continuación.

#### 3.2.5.1. Normalidad de errores

##### Hipótesis

**H<sub>0</sub>:** “Los errores residuales tienen una distribución normal”

**H<sub>1</sub>:** “Los errores residuales no tienen distribución normal”

En la Tabla 19 se muestran los errores de los errores de porcentaje de remoción de DQO.

**Tabla 19**

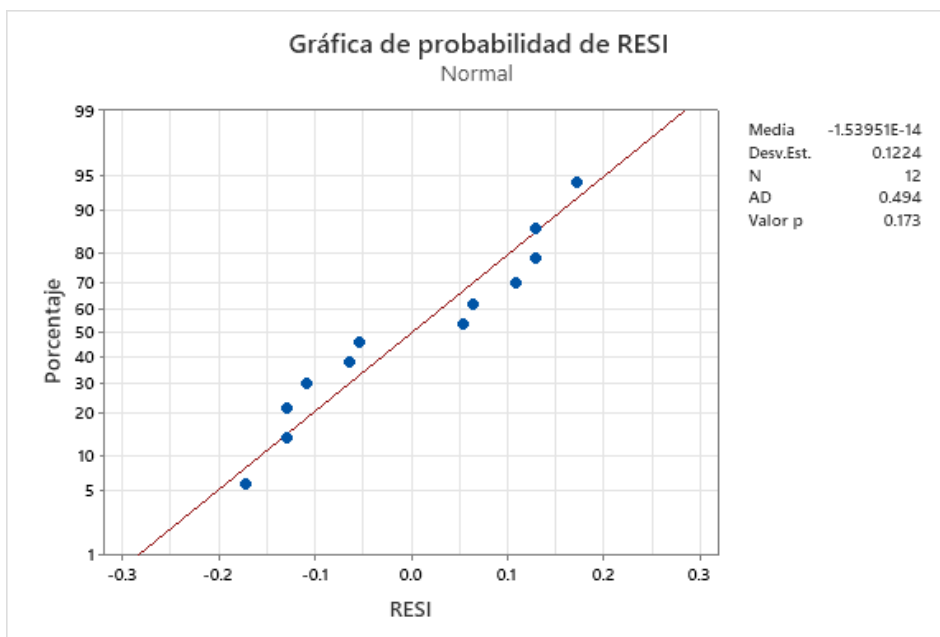
*“Residuos del porcentaje de remoción de DQO”*

pH	Cantidad de Peróxido requerido	Remoción (%)	Residuos
3	100%	92.51	-0.173
3	100%	92.86	0.173
3	70%	93.16	0.065
3	70%	93.03	-0.065
3	50%	93.37	0.130
3	50%	93.12	-0.130
5	100%	91.34	0.108
5	100%	91.12	-0.108
5	70%	87.92	-0.053
5	70%	88.03	0.053
5	50%	84.50	0.130
5	50%	84.24	-0.130

A los errores obtenidos se le aplica la prueba Anderson-Darling; los resultados se muestran en la Figura 8.

**Figura 8**

*Prueba de normalidad de errores*



**Nivel de significancia:**  $\alpha = 5 \% = 0.05$

**Prueba estadística:** Anderson-Darling

**p valor:** 0.173

**AD:** 0494

**Decisión:** Como  $\alpha$  (0.05) es menor a valor p (0.1),  $\alpha < p$ -value; entonces, “no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula”, por lo que “se acepta la hipótesis nula”.

**Conclusión:** “Con una significancia de 0.05, se concluye que los errores tienen una distribución normal, por lo que se cumple el supuesto de normalidad de errores”.

### 3.2.5.2. Homogeneidad de Varianzas:

**H<sub>0</sub>:** Las varianzas son homogéneas

**H<sub>1</sub>:** Al menos una varianza es diferente

A los resultados obtenidos se le aplica la prueba Bartlett; los resultados se muestran en la Tabla 20

Prueba de varianza.

**Tabla 20**

*Prueba de varianza*

Método	Estadística de prueba	Valor p
Bartlett	1.24	0.941

**Nivel de significancia:**  $\alpha = 5 \% = 0.05$

**Prueba estadística:** Bartlett

**p valor:** 0.941

**Bartlett:** 1.24

**Decisión:** Como  $\alpha$  (0.05) es menor a valor p (0.941),  $\alpha < p$ -value; por lo que “no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula”, en consecuencia “se acepta la hipótesis nula”.

**Conclusión:** Con una significancia de 0.05, se concluye que las “todas las varianzas son homogéneas”, por lo que se cumple el supuesto homogeneidad de las varianzas.

Como se cumple los supuestos de normalidad de los errores y la homogeneidad de varianzas, pasamos a realizar la prueba de normalidad.

### 3.2.5.3. Prueba ANOVA

#### 3.2.5.3.1. Influencia de la interacción de los niveles de pH y cantidad de peróxido de hidrogeno.

**Hipótesis:**

**H<sub>0</sub>:** No hay interacción entre el potencial de hidrógeno y la cantidad de peróxido de hidrógeno que influya en la remoción de la demandad química de oxígeno de las aguas residuales de los salones de belleza mediante en tratamiento foto-Fenton.

**H<sub>1</sub>:** Existe interacción entre el potencial de hidrógeno y la cantidad de peróxido de hidrógeno que influya en la remoción de la demandad química de oxígeno de las aguas residuales de los salones de belleza mediante en tratamiento foto-Fenton.

**Tabla 21**

*Información de factores*

<b>Factor</b>	<b>Tipo</b>	<b>Niveles</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidad</b>
Potencial de Hidrógeno	Fijo	2	3; 5	pH
Cantidad de Peróxido	Fijo	3	50; 70; 100	% de requerido estequiométricamente

**Tabla 22**

*“Análisis de Varianza (Tabla ANOVA)”*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Potencial de Hidrógeno	1	79.478	79.4780	2893.54	0.000
Cantidad de Peróxido	2	19.912	9.9561	362.47	0.000
Potencial de Hidrógeno*Cantidad de Peróxido	2	27.572	13.7860	501.90	0.000
Error	6	0.165	0.0275		
Total	11	127.127			

**Nivel de significancia:**  $\alpha = 5 \% = 0.05$

**Prueba estadística:** Anova

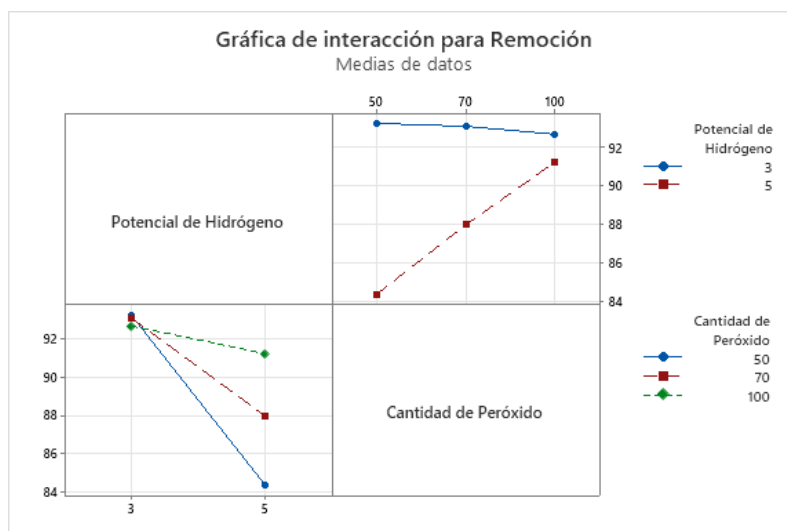
**p valor:** 0.000

**Decisión:** Como  $\alpha$  (0.05) es mayor a valor p (0.000),  $\alpha > p$ -value (ver Tabla 22); “existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula”, por lo que se rechaza “la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna”.

**Conclusión:** Con una significancia de 0.05, se concluye que existe interacción entre el potencial de hidrógeno y la cantidad de peróxido de hidrógeno que influye en la remoción de la demandad química de oxígeno de las aguas residuales de los salones de belleza mediante el tratamiento foto-Fenton, esta interacción puede ser se puede observar en la

**Figura 9**

*Gráfica de interacción para Remoción*



### 3.2.5.3.2. Influencia del potencial de hidrógeno (pH)

**H<sub>0</sub>:** “El potencial de hidrógeno no influye en la remoción de la demandad química de oxígeno de las aguas residuales mediante en tratamiento foto-Fenton”.

**H<sub>1</sub>:** “El potencial de hidrógeno influye en la remoción de la demandad química de oxígeno de las aguas residuales mediante en tratamiento foto-Fenton”.

**Nivel de significancia:**  $\alpha = 5 \% = 0.05$

**Prueba estadística:** Anova

**p valor:** 0.000

**Decisión:** Los resultados de la prueba muestran que el valor p es menor a  $\alpha$  (0.05),  $p\text{-value} < \alpha$ ; por lo que “se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna”.

**Conclusión:** Con una significancia de 0.05, se concluye que el potencial de hidrógeno influye en la remoción de la demanda química de oxígeno de las aguas residuales mediante en tratamiento foto-Fenton.

### 3.2.5.3.3. Influencia de la cantidad de peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

**Hipótesis:**

**H<sub>0</sub>:** La cantidad de peróxido de hidrógeno no influye en la remoción de la demandad química de oxígeno de las aguas residuales mediante en tratamiento foto-Fenton.

**H<sub>1</sub>:** La cantidad de peróxido de hidrógeno influye en la remoción de la demandad química de oxígeno de las aguas residuales mediante en tratamiento foto-Fenton.

**Nivel de significancia:**  $\alpha = 5 \% = 0.05$

**Prueba estadística:** Anova

**p valor:** 0.000

**Decisión:** Los resultados de la prueba muestran que el valor p es menor a  $\alpha$  (0.05),  $p$ -value <  $\alpha$ ; por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna.

**Conclusión:** Con una significancia de 0.05, se concluye que la cantidad de reactivo peróxido de hidrógeno influye en la degradación de la demanda química de oxígeno de las aguas residuales mediante en tratamiento foto-Fenton.

Como se ha comprobado que existe influencia de la interacción del potencial de hidrógeno y cantidad del reactivo peróxido de hidrógeno, se realiza las comparaciones de las medias individuales provenientes de los tratamientos distintos (de cada grupo) con el fin discernir cuales resultados son significativamente distintos mediante La prueba de Tukey.

### 3.2.5.4. Comparaciones múltiples (Tukey)

#### 3.2.5.4.1. Comparaciones por parejas de Tukey: Potencial de Hidrógeno

**Tabla 23**

*Agrupación de resultados de para los niveles de potencial de hidrógeno, utilizando el método de Tukey con una confianza de 95%.*

Potencial de Hidrógeno	N	Media de % remoción	Agrupación
3	6	93.006 9	A
5	6	87.859 8	B

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

#### 3.2.5.4.2. Comparaciones por parejas de Tukey: Cantidad de Peróxido

**Tabla 24**

*Agrupación de resultados de para los niveles de cantidad de peróxido de hidrógeno, utilizando el método de Tukey con una confianza de 95%*

Cantidad de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	N	Media de % remoción	Agrupación
100 %	4	91.957 7	A
70 %	4	90.535 0	B
50 %	4	88.807 3	C

"Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes".

#### 3.2.5.4.3. Comparaciones por parejas de Tukey: Potencial de Hidrógeno\*Cantidad de Peróxido

**Tabla 25**

*Agrupación de resultados para la interacción de potencial de hidrógeno y cantidad de peróxido de hidrógeno, utilizando el método de Tukey con una confianza de 95%*

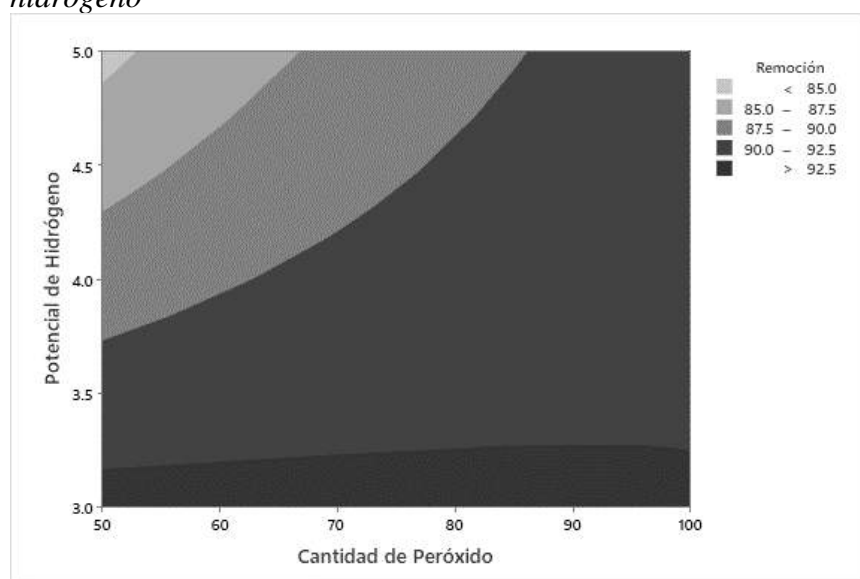
Potencial de Hidrógeno* cantidad de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	N	Media	Agrupación
3 50%	2	93.244 9	A
3 70%	2	93.093 5	A
3 100%	2	92.682 4	A
5 100%	2	91.233 1	B
5 70%	2	87.976 6	C
5 50%	2	84.369 8	D

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

La Tabla 25, muestra que la mejor remoción se obtienen a pH 3 y 50 % del peróxido de hidrógeno requerido estequiométricamente (93.24 % de remoción de DQO); además se obtienen resultados estadísticamente iguales a pH 3, al 70 % del peróxido de hidrógeno requerido estequiométricamente (93.09 % de remoción de DQO), y 100 % del peróxido de hidrógeno requerido estequiométricamente (92.68 % de remoción de DQO) (ver Tabla 25); estos resultados ya fueron discutidos en la sección 3.2.2 y 3.2.3. La Figura 10 muestra que las mayores remociones se obtienen a pH 3 con diferentes cantidades peróxido de hidrógeno, remociones de DQO mayores a 92.5 %; las remociones mínimas a pH 5, obteniendo siendo la menor remoción a 50 % de peróxido estequiométrico requerido con una remoción 84.37 %.

**Figura 10**

*Gráfica de contorno de Remoción vs. Potencial de Hidrogeno; Cantidad de Peróxido de hidrógeno*



## CONCLUSIONES

Las mejores condiciones óptimas para los parámetros para un tratamiento foto-Fenton en la presente investigación para el tipo de aguas residuales de los salones de belleza, a las condiciones establecidas de la presente investigación, son a pH 3 y 50 %, 70 % y 100 % de peróxido de hidrógeno del requerido estequiométricamente (2.125 g de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/g de DQO) logrando una remoción mayor a 92.5 %

Los efluentes de los salones de belleza presentan altas cargas contaminantes orgánicos (DBO<sub>5</sub>, DQO, sólidos suspendidos, aceites y grasas), que superaran los valores máximos permisibles (VMA); además presentan un índice de biodegradabilidad en una relación proporcional de (DBO<sub>5</sub>/DQO) de 0.14, lo que significa que los tratamientos biológicos o llamados también convencionales no resultaran efectivos para la remoción de contaminantes orgánicos.

Las cantidades adecuadas de peróxido de hidrógeno para lograr altos porcentajes de degradación de la DQO contenido en aguas residuales de un salón de belleza por el proceso de tratamiento foto-Fenton son 50 % hidrógeno del requerido estequiométricamente (2.125 g de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/g de DQO).

El pH idóneo para la degradación del parámetro DQO contenido en aguas residuales de un salón de belleza por tratamiento foto-Fenton son a pH 3.

## **RECOMENDACIONES**

- Para otros estudios se recomienda considerar la influencia de las demás variables como potencia de lámpara UV, etapas de alimentación, cantidad inicial de DQO, etapas de alimentación del peróxido de hidrogeno, temperatura.
- Cuantificar la cantidad de peróxido de hidrógeno después del tratamiento ( $H_2O_2$  residual), debido a que este se considera como un contaminante.
- Se recomienda complementar el tratamiento Foto Fenton con otros tratamientos convencionales, además considerar solo utilizar en muestras no biodegradables debido a su costo relativo elevado

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICA

- Adak, A., Bandyopadhyay, M., & Pal, A. (2005). Removal of anionic surfactant from wastewater by alumina: A case study. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 254(1–3), 165–171. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2004.12.004>
- Ameta, R., Chohadia, A. K., Jain, A., & Punjabi, P. B. (2018). Fenton and Photo-Fenton Processes. In *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Emerging Green Chemical Technology*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00003-6>
- Anaya Meléndez, F. (2019). Tratamiento de aguas residuales con colorantes reactivos mediante proceso de oxidación avanzada Fenton y variantes. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 3(1), 55. <https://doi.org/10.25127/aps.20191.483>
- APHA, AWWA, & WPCF. (1992). *Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales* (S. A. Ediciones Díaz de Santos (Ed.); 17 Edition).
- Arangure, L. (2013). Modelo de gestión para el tratamiento de aguas residuales dentro del área de prestación del servicio de alcantarillado en el municipio de Cajicá - Cundinamarca. *Tesis*, 103. [http://intellectum.unisabana.edu.co:8080/jspui/bitstream/10818/10409/1/Lina María Arangure Burgos\(TESIS\).pdf](http://intellectum.unisabana.edu.co:8080/jspui/bitstream/10818/10409/1/Lina%20María%20Arangure%20Burgos(TESIS).pdf)
- Bandala, E. R., Velasco, Y., & Torres, L. G. (2008). Decontamination of soil washing wastewater using solar driven advanced oxidation processes. *Journal of Hazardous Materials*, 160(2–3), 402–407. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.011>
- Bauer, R., & Fallmann, H. (1997). The Photo-Fenton oxidation - A cheap and efficient wastewater treatment method. *Research on Chemical Intermediates*, 23(4), 341–354. <https://doi.org/10.1163/156856797X00565>
- Bautista, P., Mohedano, A. F., Gilarranz, M. A., Casas, J. A., & Rodriguez, J. J. (2007). Application of Fenton oxidation to cosmetic wastewaters treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 143(1–2), 128–134. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.004>
- Blanco J., J. (2009). *Degradación de un efluente textil real mediante procesos Fenton y Foto-Fenton*. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/8325/01.pdf?sequence=1>
- Bowers, F. (2002). Characterizing Beauty Salon Wastewater for the Purpose of Regulating Onsite Disposal Systems. *New Jersey Department of Environmental Protection Division*

- of Water Quality, August, 14, 2002.* <http://www.state.nj.us/dep/dwq/pdf/salonreport.pdf>"
- Castillo Cortés, M., Coto Campos, J., & Herrera Núñez, J. (2012). Desechos líquidos: el caso de las salas de belleza. *Uniciencia*, 26(1–2), 23–27.
- Cervantes Rodríguez, D., Chávez Rodríguez, M. J., Delgado Vásquez, C. R., & Loayza Rojas, J. M. (2020). *PLAN DE NEGOCIOS PARA LA CREACIÓN DE UN SALÓN DE BELLEZA MÓVIL*. [Universidad San Ignacio Loyola]. [http://repositorio.usil.edu.pe/bitstream/USIL/10545/1/2020\\_Cervantes Rodríguez.pdf](http://repositorio.usil.edu.pe/bitstream/USIL/10545/1/2020_Cervantes Rodríguez.pdf)
- Cheng, M., Ma, W., Li, J., Huang, Y., Zhao, J., Wen, Y. X., & Xu, Y. (2004). Visible-Light-Assisted Degradation of Dye Pollutants over Fe(III)-Loaded Resin in the Presence of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> at Neutral pH Values. *Environmental Science and Technology*, 38(5), 1569–1575. <https://doi.org/10.1021/es034442>
- Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU) - Gobierno del Perú.* (2020). <https://www.gob.pe/institucion/sunat/informes-publicaciones/394120-clasificacion-industrial-internacional-uniforme-ciiu>
- Delée, W., O'Neill, C., Hawkes, F. R., & Pinheiro, H. M. (1998). Anaerobic treatment of textile effluents: A review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 73(4), 323–335. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4660\(199812\)73:4<323::AID-JCTB976>3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4660(199812)73:4<323::AID-JCTB976>3.0.CO;2-S)
- Delgado Nina, D. A., & Santander Pacoricona, N. E. (2017). Remoción de coloración de tintes de teñido en aguas residuales de la industria textil, utilizando Procesos de Oxidación Avanzada (POA). *Facultad De Ingeniería Química*, 141. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4227>
- Duesterberg, C. K., Mylon, S. E., & Waite, T. D. (2008). pH effects on iron-catalyzed oxidation using Fenton's reagent. *Environmental Science and Technology*, 42(22), 8522–8527. <https://doi.org/10.1021/es801720d>
- Dunford, H. B. (2002). Oxidations of iron(II)/(III) by hydrogen peroxide: From aquo to enzyme. *Coordination Chemistry Reviews*, 233–234, 311–318. [https://doi.org/10.1016/S0010-8545\(02\)00024-3](https://doi.org/10.1016/S0010-8545(02)00024-3)
- Edge, C. (2015). *Efficacy of the fenton reaction for degrading allura red azo dye: applications for use in hair salon greywater treatment systems* (Issue December)
- Gupta, V. K., & Suhas. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal - A review. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2313–2342. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>
- Hernández, S. A., Lloret, R. B., & Kraser, R. B. (2019). Estudio de sustancias potencialmente peligrosas presentes en tinturas para el cabello. Aportes a la cosmética desde un enfoque

- CTS. *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Del Ambiente*.  
<http://jornadasceyn.fahce.unlp.edu.ar>.
- Ince, N. H., & Tezcanli, G. (1999). Treatability of textile dye-bath effluents by advanced oxidation: Preparation for reuse. *Water Science and Technology*, 40(1), 183–190.  
[https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00379-0](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00379-0)
- Kremer, M. L. (1999). Mechanism of the Fenton reaction. Evidence for a new intermediate. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 1(15), 3595–3605.  
<https://doi.org/10.1039/a903915e>
- Mirzaei, A., Chen, Z., Haghghat, F., & Yerushalmi, L. (2017). Removal of pharmaceuticals from water by homo/heterogenous Fenton-type processes – A review. *Chemosphere*, 174, 665–688. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.019>
- Montero Reyes, R. (2020, May 12). *Los pequeños negocios y la pandemia*. 1–1.  
<https://elperuano.pe/noticia/95730-los-pequenos-negocios-y-la-pandemia>
- MVCS. (2019). Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario. *El Peruano*, 20.
- Nelly Ardila Arias, A., Reyes Calle, J., Arriola Villaseñor, E., & Alfredo Hernández, J. (1900). *Remoción fotocatalítica de dco, dco5 y cot de efluentes de la industria farmacéutica*. 8(9), 9–17.
- OEFA. (2014, April). *FISCALIZACIÓN AMBIENTAL EN AGUAS RESIDUALES*. Cyclus Print Matt. [https://www.oefa.gob.pe/?wpfb\\_dl=7827](https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827)
- Peña R., M., & Díaz B., C. E. (2020). Oxidación avanzada en el tratamiento de aguas residuales. In *Tecnología del agua* (Primera ed, Vol. 197). Universidad Autónoma del Estado de México. <http://www.uaemex.mx>
- Pereira, L. M. G. (2015). *Tratamento de efluente da indústria de cosméticos via reagente de fenton e adsorção*. Universidad Federal de Goias.
- Pesterfield, L. L., Maddox, J. B., Crocker, M. S., & Schweitzer, G. K. (2012). Pourbaix (E - pH-M) diagrams in three dimensions. *Journal of Chemical Education*, 89(7), 891–899.  
<https://doi.org/10.1021/ed200423n>
- Pilco, A., & Gutierrez, C. (2020). OPTIMIZACIÓN DE LA REMOCIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS PERSISTENTES MEDIANTE EL PROCESO FOTO-FENTON. *Rev Soc Quím Perú*, 86(1). <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v86n1/2309-8740-rsqp-86-01-58.pdf>
- Pliego Rodriguez, G. (2012). *Intensificación del proceso Fenton para el tratamiento de aguas*

*residuales industriales*. Univesiad Autonoma de Madrid.

- Rai, H. S., Bhattacharyya, M. S., Singh, J., Bansal, T. K., Vats, P., & Banerjee, U. C. (2005). Removal of dyes from the effluent of textile and dyestuff manufacturing industry: A review of emerging techniques with reference to biological treatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 35(3), 219–238. <https://doi.org/10.1080/10643380590917932>
- Ramos-Jiménez, K., & Jiménez-Barrios, Y. (2016). Degradación de desechos tóxicos provenientes de laboratorios universitarios con foto-fenton solar usando diseño de experimentos. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 32(1), 119–131.
- Rivas Garrido, Y. A. (2018). *Aplicación de proceso foto-fenton en aguas con parabenos. Análisis de fotodegradación y fotodetoxicación*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Rodriguez Fernández-Alba, A., Letón García, P., Rosal García, R., Dorado Valiño, M., Villar Fernández, S., & Sanz García, J. M. (2006). Tratamientos Avanzados De Aguas Residuales Industriales. *Citme*, 6,8. 13, 30, 34.
- Sevimli, M. F., Deliktaş, E., Şahinkaya, S., & Güçlü, D. (2014). A comparative study for treatment of white liquor by different applications of Fenton process. *Arabian Journal of Chemistry*, 7(6), 1116–1123. <https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2012.12.015>
- Silva A., S. M., Trujillo S., J., Aguilar M., L. G., & Hincapié P., M. (2009). TRATAMIENTO DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS POR FOTO FENTON CON LUZ ARTIFICIAL. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 15, 53–62. <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v8n15/v8n15a05.pdf>
- Torres Andrade, G. F. (2014). Tratamiento De Aguas Residuales Mediante La Combinación De Técnicas Avanzadas De Oxidación Y Biofiltros. *Universidad De Las Palmas De Gran Canaria*, 41–80.