

UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**UNIVERSIDAD ALAS
PERUANAS**

TESIS

**“EFICIENCIA DE FOTOCATÁLISIS HOMOGÉNEA EN LA
REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA DE LAS AGUAS
RESIDUALES DEL FRIGORÍFICO CÁRNICOS DEL
CENTRO S.A.C. FRICACEN DISTRITO DE CONCEPCIÓN -
JUNÍN 2016”**

PRESENTADO POR LA BACHILLER:

SANCHEZ MACHA, Yoshelin Yerly

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL
HUANCAYO-PERÚ**

2016

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a Dios, ya que gracias a él he logrado concluir mi carrera.

A mis padres JESUS y NORA, porque ellos siempre estuvieron a mi lado brindándome su apoyo y sus consejos para hacer de mí una mejor persona cada día.

A mis hermanos y a mis primos por sus palabras y compañía, a mis abuelitos ARSENIO y SOFIA aunque no estén físicamente con nosotros, pero sé que desde el cielo siempre me cuidan y me guían para que todo salga bien.

A todas aquellas personas que de una manera u otra han contribuido para el logro de mis objetivos.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios que me dio fuerza y fe para creer lo que me parecía imposible.

A mis Padres Jesús y Nora, por darme el ejemplo de vida a seguir, por la confianza y el apoyo brindado, que sin duda alguna en el trayecto de mi vida me han demostrado su amor, corrigiendo mis faltas y celebrando mis triunfos.

A Dreyberth Sánchez, pequeño con grandes logros y ahora ha sido capaz de ganarse mi lealtad y admiración.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.	viii
ÍNDICE DE TABLA.....	ix
ÍNDICE DE FIGURA	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN	xvi
CAPÍTULO I	18
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.1 Caracterización de la realidad problemática	18
1.2 Formulación del problema.....	19
1.2.1 Problema general	19
1.2.2 Problemas específicos	19
1.3 Objetivos	20
1.3.1 Objetivo general	20
1.3.2 Objetivos específicos.....	20
1.4 Justificación	20
1.5 Importancia	21
1.6 Limitaciones	21
CAPÍTULO II	22

2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	22
2.1	Marco referencial	22
2.1.1	Antecedentes de la investigación	22
2.1.2	Referencias históricas.	25
2.2	Marco legal	26
2.2.1	Decretos	30
2.3	Marco conceptual.....	31
2.4	Marco teórico.	32
2.4.1	Aguas residuales de camales.....	32
2.4.2	Procesos de oxidación avanzada (POA´S)	36
2.4.3	Fotocatálisis heterogénea	40
2.4.4	Fotocatálisis homogénea.....	42
2.4.5	Mecanismo Fenton y Foto Fenton	42
	CAPÍTULO III	55
3	PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO	55
3.1	Metodología	55
3.1.1	Ubicación de efluente del frigorífico FRICACEN S.A.C.....	55
3.1.2	Construcción de una porta lámparas de UV	56
3.1.3	Equipos de prueba de jarras	56
3.1.4	Tratamiento del agua residual de frigorífico	57
3.1.5	Preparación del reactivo Foto Fenton.....	57
3.1.6	Preparación del H ₂ O ₂	59
3.1.7	Implementación de sistema Foto Fenton.....	60
3.1.8	Determinación de la materia orgánica	62

3.1.9	Tipo de la investigación	62
3.1.10	Nivel de la investigación.....	62
3.2	Diseño de la investigación.	62
3.3	Hipótesis de la investigación.....	63
3.3.1	Hipótesis general.....	63
3.3.2	Hipótesis específicas.....	63
3.4	Variables	64
3.4.1	Variable independiente.....	64
3.4.2	Variable dependiente.....	64
3.5	Cobertura del estudio.....	64
3.5.1	Universo.	64
3.5.2	Población.....	64
3.5.3	Muestra.	64
3.5.4	Muestreo	64
3.6	Técnicas e instrumentos	64
3.6.1	Técnicas de la investigación.....	64
3.6.2	Instrumentos de la investigación.	64
3.7	Procesamiento estadístico de la información.....	65
3.7.1	Estadísticos.	65
3.7.2	Representación.	65
3.7.3	Técnica de comprobación de la hipótesis.....	65
CAPITULO IV.....		66
4	ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	66
4.1	Resultados.....	66

4.1.1	Caracterización de las aguas residuales industriales del frigorífico...	66
4.1.2	Tratamientos experimentales	67
4.2	Discusión de resultados	77
4.3	Contrastación de Hipótesis	90
CONCLUSIONES		95
RECOMENDACIONES		96
BIBLIOGRAFÍA		97
ANEXOS		101

ÍNDICE DE ABREVIATURAS.

COT	: Carbono orgánico total
DBO	: Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	: Demanda química de oxígeno
EPA	: Agencia de protección Ambiental
I	: Infiltración
mg/L	: Miligramos por litro
Min	: Minutos
mL	: Mililitros
P	: Precipitación
POAs	: Procesos de oxidación avanzada
SDV	: Sólidos volátiles disueltos
SS	: Sólidos en suspensión
STD	: Sólidos totales disueltos
SVS	: Sólidos volátiles en suspensión
TOAs	: Tecnologías de oxidación avanzada
TRH	: Tiempo de retención hidráulica
UV	: Ultravioleta

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1 Condición general del agua residual	36
Tabla 2 Clasificación de muestras	39
Tabla 3 Diseño de la investigación	63
Tabla 4 Caracterización del agua residual del frigorífico	67
Tabla 5 Valores de las variables de investigación	67
Tabla 6 Resultado de los tratamientos con 15 W de UV	68
Tabla 7 Resultado de los tratamientos con 30 W de UV	69
Tabla 8 Resultados de los tratamientos con 45 W de UV.....	71
Tabla 9 Resultados de los tratamientos con 45 W de UV y 100 mg de FeSO ₄ y 0,4 de H ₂ O ₂	74
Tabla 10 Resultados % de remoción DQO y DBO ₅ en 15W de UV	77
Tabla 11 Resultados de los tratamientos con 30W de UV.....	79
Tabla 12 Resultado de los tratamientos con 45W de UV	82

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1 Reacciones en la interface semiconductor-analito en presencia de luz .	42
Figura 2 Mecanismos de reacción de Foto Fenton.....	46
Figura 3 Esquema del ciclo catalítico de la reacción Foto Fenton	46
Figura 4 Diagrama de fracción de las especies de Fe (III) y Fe (OH) ₂ en Equilibrio a 25°C	49
Figura 5 Ubicación geográfica del Frigorífico Fricacen S.A.C	55
Figura 6 porta lámparas UV.....	56
Figura 7 Equipo de prueba de jarras Lovibond.....	56
Figura 8 Agua Residual del Frigorífico.....	57
Figura 9 Pesado del sulfato de hierro	58
Figura 10 Las masas de sulfato de hierro para las pruebas experimentales	58
Figura 11 Preparación de concentración de H ₂ O ₂	58
Figura 12 Medición de pH de Agua Residual del Frigorífico	60
Figura 13 Instalación de lámpara UV.....	60
Figura 14 puesta en marcha del sistema Foto Fenton.....	61
Figura 15 cubriendo el sistema Foto Fenton	61
Figura 16 DQO y DBO ₅ en el tratamiento con 15W de UV	69
Figura 17 DQO y DBO ₅ en el tratamiento con 30W de UV	70
Figura 18 DQO y DBO ₅ en el tratamiento con 45W de UV	72
Figura 19 El pH en el tratamiento con 15W de UV	72
Figura 20 El pH en el tratamiento con 30W de UV	73
Figura 21 El pH en el tratamiento con 45W de UV	74

Figura 22 Reducción de DQO	75
Figura 23 Reducción de DBO ₅	76
Figura 24 Tratamiento de Foto Fenton con 15W de UV	79
Figura 25 Tratamiento de Foto Fenton con 30W de UV	81
Figura 26 Comparación de Solidos Suspendidos con 30W de UV	82
Figura 27 Tratamiento de Foto Fenton con 45W de UV	84
Figura 28 Comparación de Solidos Suspendidos con 30W de UV	84
Figura 29 % de remoción DQO y DBO ₅ CON 15W de UV	85
Figura 30 % de remoción DQO y DBO ₅ CON 30W de UV	85
Figura 31 % de remoción DQO y DBO ₅ CON 45W de UV	86
Figura 32 Relación de DBO ₅ /DQO con 15W de UV.....	87
Figura 33 Relación de DBO ₅ /DQO con 30W de UV.....	87
Figura 34 Relación de DBO ₅ /DQO con 45W de UV.....	88
Figura 35 % de remoción de DQO.....	89
Figura 36 % de remoción de DBO ₅	89
Figura 37 Interval Plot of DQO vs tratamiento	91
Figura 38 Interval Plot of DBO ₅ vs tratamiento	93

RESUMEN

El impacto causado en los recursos hídricos por las aguas residuales provenientes del Frigorífico FRICACEN, que son utilizados por los centros poblados aledaños como agua de riego para sus cultivos es un gran problema que hoy en día tiene la provincia de Concepción, buscando soluciones se han implementado los procesos de oxidación avanzada (POA) como una alternativa tecnológicamente viable y novedosa para el tratamiento de los efluentes líquidos de dicha empresa. Entre los procesos más utilizados se encuentra la fotocatalisis homogénea que consiste en la aceleración de una fotorreacción mediante un catalizador que es la radiación UV y según los estudios la provincia de Concepción es una de las zonas de mayor radiación en la región Junín.

La aplicación de la fotocatalisis homogénea es un método de mayor sostenibilidad al proceso, y es especialmente aplicada para la eliminación de efluentes con carga de carbono orgánico moderada o altas y compuestos no degradables.

Habiéndose caracterizado fisicoquímicamente las aguas residuales industriales del frigorífico FRICACEN del distrito de Concepción, obteniendo 1845,0 mg/L de sólidos disueltos; 1391,0 mg/L de sólidos suspendidos; 3236,0 mg/L de sólidos totales; 0,0 mg/L de O_2 ; 7,4 de pH; 3574 $\mu\text{Sm/cm}$; 5803,5 mg/L de DQO y 3501,0 mg/L de DBO_5 .

Al evaluar la radiación UV para 15W, 30W y 45W en los tratamientos T1, T2 y T3 siendo el de mayor reducción de DQO y DBO_5 para una potencia de 45 W de UV y siendo este el más óptimo, con respecto a las concentraciones de H_2O_2 el de mayor reducción fue de 0,4 M y para el FeSO_4 de 100 gramos en un periodo de mezcla completa de 60 minutos.

La disminución de la DQO y DBO_5 del efluente se registró un valor inicial de 5823,1 mg/L de DQO y se redujo a 465,8 mg/L de DQO obtenido un 92% de remoción de DQO, de igual manera se registró un valor inicial de 3421 mg/L de DBO_5 el cual se redujo a 228,9 mg/L de DBO_5 obteniendo un 93,3% de remoción

de DBO_5 siendo estos valores los mayores obtenidos en los diferentes tratamientos.

El tratamiento de fotocátalisis homogénea (Foto Fenton) es muy eficiente en la reducción de materia orgánica y unos de los factores que influyen es la radiación UV y la cantidad de catalizador que requiere para el tratamiento.

ABSTRACT

The impact caused in the water resources by the wastewater from FRICACEN, which are used by neighboring towns as irrigation water for their crops is a major problem that today has the province of Concepción, seeking solutions have been implemented. The advanced oxidation processes (AOP) as a technologically viable and novel alternative for the treatment of the liquid effluents of these companies. Among the most used processes is homogenized photocatalysis consisting of the acceleration of a photoreaction by a catalyst that is UV radiation and according to the studies the province of Concepción is one of the zones of greater radiation in the Junín region.

The application of homogeneous photocatalysis confers a greater sustainability to the process and is especially attractive for the elimination of effluents that fulfill some characteristics such as: moderate or low organic carbon loading, compounds that are not degradable by biological or conventional methods, pollutants of high toxicity. Or the possibility of operating in discontinuous mode.

The industrial waste water of the FRICACEN refrigerator in the Concepción district was physicochemically characterized, obtaining 1845,0 mg/L of solids dissolved; 1391,0 mg/L of suspended solids; 3236,0 mg/L of total solids; 0,0 mg/L O_2 ; 7,4 pH; 3574 $\mu\text{Sm/cm}$; 5803,5 mg/L of DQO and 3501,0 mg/L of DBO_5 .

When evaluating the UV radiation for 15W, 30W and 45W in the treatments T1, T2 and T3 being the one of greater reduction of DQO and DBO_5 for a power of 45 W of UV and being this the more optimum, with respect to the concentrations of H_2O_2 . The one of greater reduction was of 0,4 M and for the FeSO_4 of 100 grams in a period of complete mixture of 60 minutes.

The reduction of DQO and DBO_5 of the effluent registered an initial value of 5823,1 mg/L of DQO and was reduced to 465,8 mg/L of DQO obtained by a 92% removal of DQO, in the same way a Initial value of 3421 mg/L of DBO_5 which was reduced to 228,9 mg/L of DBO_5 obtaining a 93,3% of removal of DBO_5 being these values the highest obtained in the different treatments.

The homogeneous photocatalysis (photo fenton) treatment is very efficient in the reduction of organic matter and one of the influencing factors is the UV radiation and the amount of catalyst required for the treatment.

INTRODUCCIÓN

Actualmente un problema ambiental de importancia es la disposición final de los residuos líquidos, los cuales en su gran mayoría están siendo vertidos a los sistemas de alcantarillado sin tratamiento previo y su importancia, en cuanto a contaminación, viene dada por su fuerte contenido de carga orgánica, la cual es producto de su paso, con arrastre y disolución.

Los residuos líquidos de un centro de matadero son efluentes que contienen sangre, pelos, grasas, proteínas, entre otros. La generación de vertidos de aguas residuales tiene una carga orgánica, DBO y de nutrientes media-alta (sangre) con un contenido importante de sólidos en suspensión, donde el arrojado de estas es mayormente en las diversas fiestas y feria de animales que son realizadas en el lugar, donde la principal fuente de contaminación es el río del Mantaro.

El mayor contaminante del camal, es la sangre, ya que este residuo no es aprovechado y es evacuado al exterior, las heces de los animales presentan malos olores por el natural proceso de descomposición, a consecuencia tenemos problemas sanitarios de importancia, es el principal mecanismo de transmisión de enfermedades microbianas y parasitarias por ingestión de los animales aledaños y enfermedades producidas por el contacto con el agua como (esquistosomiasis, dracunculiasis), enfermedades dermatológicas a las poblaciones aledañas, principalmente a los niños y ancianos. Sin embargo, se ha de procurar la minimización del impacto ambiental que ocasionan estas aguas residuales como es la contaminación del agua que es un hecho de gran importancia ya que los contaminantes pueden acumularse y transportarse por las aguas superficiales.

Sabemos que la protección y conservación de los recursos naturales constituyen hoy en día una de las principales preocupaciones sociales. La necesidad de preservar el medio ambiente ha llevado a la búsqueda de nuevos métodos para la eliminación eficiente de los compuestos químicos, biológicos y patógenos que alteran la estabilidad de nuestros recursos.

El proceso de tratamiento y/o purificación de aguas mediante fotocátalisis homogénea con sulfato de hierro como catalizador es, hoy por hoy, una de las aplicaciones fotoquímicas que más interés ha despertado entre la comunidad científica internacional. Por un lado, la fotocátalisis homogénea, a diferencia de la mayoría de los procesos fotoquímicos, no es selectiva y puede emplearse para tratar mezclas complejas de contaminantes. Este proceso avanzado de oxidación está definido como la aceleración de una fotorreacción mediante la presencia de un catalizador, el cual, al ser activado por la absorción de la luz, acelera el proceso e interacciona con la sustancia contaminante a través de un estado excitado o bien mediante la aparición de pares de electrón-hueco.

El objetivo de este trabajo de investigación es básicamente determinar el porcentaje de remoción de DQO y DBO₅ mediante el método de fotocátalisis homogénea (Foto Fenton) en el tratamiento de las aguas residuales industriales del Frigorífico Cárnicos del Centro S.A.C. FRICACEN a nivel de laboratorio, de esta manera minimizar el impacto ambiental al recurso hídrico del río Mantaro, ya que estas aguas residuales que genera el Frigorífico Cárnicos del Centro S.A.C. son vertidos directamente a este cuerpo natural receptor.

CAPÍTULO I

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Caracterización de la realidad problemática

Un problema actual de nuestra sociedad es la acumulación de contaminantes en diferentes sistemas como suelos, aire y acuáticos. Se han desarrollado muchos métodos para poder eliminar estos contaminantes de cualquiera de estos sistemas particularmente para los acuáticos (Ahmed, 2006).

La necesidad de preservar el medio ambiente ha llevado a la búsqueda de nuevos métodos para la eliminación eficiente de diversos compuestos que alteran la estabilidad de nuestros recursos. La contaminación del agua es un hecho de gran importancia ya que los contaminantes pueden acumularse y transportarse tanto por las aguas superficiales como subterráneas para las cuales la fuente principal de daño son las aguas residuales municipales, camales e industriales. (Santamaría, 2000).

Los residuos líquidos en un centro de matadero son efluentes que contienen sangre, pelos, grasas, proteínas, entre otros. La generación de vertidos de aguas residuales tiene una carga orgánica, DBO y de nutrientes media-alta (sangre) con un contenido importante de sólidos en suspensión, donde el arrojado de estas es mayormente en las diversas ferias de animales que son

realizadas en el lugar, donde la principal fuente de contaminación es el río del Mantaro. (Human, 1992).

El mayor contaminante del camal, es la sangre, ya que este residuo no es aprovechado y es evacuado al exterior, las heces de los animales presentan malos olores por el natural proceso de descomposición, a consecuencia tenemos problemas sanitarios de importancia, es el principal mecanismo de transmisión de enfermedades microbianas y parasitarias por ingestión de los animales aledaños y enfermedades producidas por el contacto con el agua como (esquistosomiasis, drancunliasis), enfermedades dermatológicas a las poblaciones aledañas, principalmente a los niños y ancianos.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cuál es el porcentaje de remoción de DQO y DBO₅ mediante el método de fotocátalisis homogénea (Foto Fenton) en el tratamiento de las aguas residuales industriales del Frigorífico Cárnicos del Centro S.A.C. FRICACEN a nivel de laboratorio?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales industriales del frigorífico FRICACEN del distrito de Concepción?
- ¿Cómo influye la radiación ultravioleta y los parámetros de fotocátalisis homogénea en la remoción de DQO y DBO₅ en el tratamiento de las aguas residuales industriales?
- ¿En cuánto disminuye la DQO y DBO₅ mediante el método de fotocátalisis homogénea Foto Fenton en el tratamiento de las aguas residuales industrial del frigorífico FRICACEN del distrito de Concepción?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar el porcentaje de remoción de DQO y DBO₅ mediante el método de fotocátalisis homogénea (Foto Fenton) en el tratamiento de las aguas residuales industriales del Frigorífico Cárnicos del Centro S.A.C. FRICACEN a nivel de laboratorio.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar fisicoquímicamente las aguas residuales industriales del frigorífico FRICACEN del distrito de Concepción.
- Evaluar la radiación ultravioleta y los parámetros de fotocátalisis homogénea en la remoción de DQO y DBO₅ en el tratamiento de las aguas residuales industriales.
- Determinar la disminución de la DQO y DBO₅ mediante el método de fotocátalisis homogénea Foto Fenton en el tratamiento de las aguas residuales industrial del frigorífico FRICACEN del distrito de Concepción.

1.4 Justificación

El presente trabajo de investigación busca obtener una alternativa de solución a la problemática de la contaminación del agua, mediante la fotocátalisis homogénea a causa del agua residual del frigorífico, sin ningún tipo de tratamiento, conteniendo altas concentraciones de materia orgánica, grasas, pelos, viseras y algunas sustancias usadas en el proceso de lavado. Para ello se propone la aplicación de un proceso de la fotocátalisis homogénea, con el cual se dará una alternativa de solución práctica y en corto tiempo al tipo y cantidad de contaminación que está generando el agua residual industrial del frigorífico FRICACEN.

Con este método ya se obtuvo buenos resultados en la remoción de porcentajes de materia orgánica, y la disminución de la degradación de las aguas del río ira mejorando significativamente, para que posteriormente este

recurso pueda ser provechado en distintas actividades, y se mejorará la calidad de vida de la población.

1.5 Importancia

Actualmente existen muchos métodos de desinfección, y el tratamiento mediante fotocátalisis homogénea es uno de los más eficientes y económicos. Más aun, su acción germicida se realiza en segundos o en fracciones de estos, la luz ultravioleta se produce naturalmente dentro del espectro electromagnético de las radiaciones solares en el rango comprendido de 300 y 400 nanómetro (nm) conocido como UV-C, el cual resulta letal para los microorganismos.

Este tipo de estudio se puede implementar en distintos tratamientos de agua, ya sea potable, no potable, ya que tiene una gran trascendencia en muchos países del mundo, teniendo un 99.9% eficiente resultado con el método de desinfección con lámparas o foco ultravioleta germicidas o luz ultravioleta de forma natural.

Existen diversas actividades económicas, donde cabe destacar que toda vivienda o industria, es generadora de aguas residuales y estas desechadas sin ningún tipo de tratamiento lo que este genera impactos con diferentes tipos de contaminantes.

Por otra parte, en cuanto su alcance, esta investigación podría ser mejorado en una posterior investigación para estudios que representan situaciones similares a las que aquí se plantean sirviendo como marco referencial a otras investigaciones.

1.6 Limitaciones

Entre las limitaciones se encuentran la falta de información de tratamientos de procesos Foto Fenton en aguas de frigoríficos, o tratamientos similares y otro es la accesibilidad de la adquisición de las muestras por parte de la empresa, debido a su política, los cuales se tiene que tomar las muestras fuera de la empresa.

CAPÍTULO II

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Marco referencial

2.1.1 Antecedentes de la investigación

En el estudio de (Arroyanve & Garces Giraldo, 2008), donde al evaluar la degradación del colorante Tartrazina empleando la reacción de Fenton. Se busca implementar una tecnología de oxidación avanzada para la remoción del colorante Tartrazina, ampliamente utilizado en la industria de alimentos en el medio local, nacional e internacional, donde se empleó un diseño experimental factorial aleatorio con un reactor compuesto por una cuba de vidrio como reservorio, para el almacenamiento de la muestra problema y el lugar para la reacción de degradación; adicionalmente, se dispuso de un sistema interno de mezcla para mantener la solución homogénea en el periodo de experimentación el cual se determinó en dos horas. Se utilizó una concentración inicial de 100 mg/L del colorante Tartrazina y se mantuvo la solución a un pH igual a 3,0. La degradación del colorante, se determinó mediante el empleo de la espectrofotometría UV/visible a una longitud de onda de 425 nm. Donde se logró la remoción y

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

En el estudio de (Salas C & Condorhuamán C., 2008), donde los residuos líquidos producidos en un centro de beneficio o matadero son efluentes que contienen sangre, rumen, pelos, grasas, proteínas. La generación de vertidos de aguas residuales tiene una carga orgánica, DBO y nutrientes media-alta (sangre) con un contenido importante de sólidos en suspensión (rumen), grasas y aceites, así como vertidos líquidos de la operación de escaldado y lavado de carcazas, limpieza de equipos e instalaciones. En el campo del tratamiento de aguas residuales de mataderos, la flotación por aire disuelto (DAF), se usa, entre otros, para la separación de grasas, aceites y sangre coloidal, en los cuales el DAF ha demostrado ser el sistema de separación de fases más eficiente. Durante todas las experiencias la temperatura del agua vario entre 20° y 22°C. El punto de muestreo fue el efluente que ingresa al DAF. Las características fueron: pH = 7,2; DBO (mg/L) = 9300 mg/L. DQO = 4700 mg/L, grasas y aceites = 28 mg/L. la relación aire-sólidos, A/S, en las diferentes experiencias vario entre 0,0014 y 0,0038. La máxima eficiencia de remoción de DBO es para una recirculación de 100%. La flotación con aire disuelto (DAF) permitiendo reducir la carga contaminante contenida en los efluentes generados en el matadero, reduciendo el DBO_5 en 80%, DQO en 75 % y grasas y aceites en 95 %.

En el presente trabajo de investigación titulado “Diseño e Implementación de una Unidad Piloto de Tratamiento Biológico no

Convencional para los Vertimientos Generados en el Matadero de Macanal (Corpochivor)”, realizado por (Sierra Ramírez & Vivas Albar, 2005) menciona que el tratamiento de aguas residuales se hace cada vez más importante, no sólo para reducir las cargas contaminantes que a diario son descargadas a cuerpos de agua, sino además para evitar la disminución de su capacidad de auto purificación, sobre todo cuando se trata de vertimientos industriales. Es por ello que las autoras diseñaron e implementaron para el matadero de Macanal (Boyacá) una unidad de tratamiento biológico no convencional: Reactor Facultativo de flujo a Pistón de flujo descendente (RFP). Adicionalmente, se diseñó una trampa de grasas, dos sedimentadores primarios (uno de ellos en *Stand-by*) y un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente sobre manto de lodos (*UASB*) como tratamiento preliminar y primario para disminuir las cargas afluentes al RFP y un sedimentador secundario después del RFP, para precipitación de sólidos suspendidos.

Se monitorearon varios parámetros del agua residual en el RFP (principalmente DBO, DQO, SST, Alcalinidad, AGV y Grasas y aceites) para controlar la operación de la planta.

En la fase de arranque fue necesario agregar lodo anaerobio para agilizar esta etapa o de lo contrario se hubiera requerido de más tiempo para la aclimatación de los microorganismos. En la fase de funcionamiento bajo condiciones de diseño se operó el RFP tomando como base los criterios utilizados por expertos sobre el funcionamiento del *RAP*, pero teniendo en cuenta un mecanismo de tratamiento facultativo. Se obtuvieron eficiencias hasta del 59% de remoción de DQO en solo la unidad RFP. La eficiencia total del sistema de tratamiento completo alcanzó un valor del 82%.

2.1.2 Referencias históricas.

En (Ortiz A, 1992), que para estudiar la tratabilidad anaeróbica de las aguas residuales provenientes de un matadero de ganado vacuno, se emplearon un sistema de dos filtros en serie y un tercer filtro único como testigo. Con valores promedio de carga orgánica volumétrica y tiempo de retención de 1,6 Kg/ (m³*d) y 26 horas respectivamente, las eficiencias de remoción de DQO total fueron similares en el filtro único y en el sistema en serie, del orden del 64% en promedio. Asimismo, la retención y acumulación de sólidos biológicos en el hecho. Se mostró como la principal remoción de la DQO.

La diferenciación del proceso logrado con los dos filtros en serie permitió establecer que la mayor parte de la acumulación ocurrió en el filtro primario, en tanto que lo fundamental de la bioconversión en metano se produjo en el filtro secundario en el filtro primario, en tanto que lo fundamental de la bioconversión en metano se produjo en el filtro secundario del sistema en serie.

El bajo nivel relativo de metanogénización obtenido podría explicarse por las limitaciones a la actividad de la biomasa metanogénica impuesta por las bajas temperaturas, aunque no se podría descartar una probable inhibición por los productos de hidrólisis de las grasas acumuladas.

En el estudio (Fernando Garcés, & Mejía Franco, 2002), en el presente se realizó una revisión de los POA, concentrándose en los procesos de fotooxidación, para la minimización de los impactos causados en los recursos hídricos por las industrias, en los últimos años se han implementado los procesos de oxidación avanzada (POA) como una alternativa tecnológicamente viable y novedosa para el tratamiento de los efluentes líquidos de dichas empresas. Los POA consisten básicamente en la formación de radical hidroxilo altamente oxidante, los cuales contribuyen a la mineralización total de los compuestos contaminantes

presentes en los efluentes industriales. Entre los procesos más utilizados se encuentra la fotocatalisis que consiste en la aceleración de una fotorreacción mediante un catalizador.

En el estudio (Marcos Hernandez & Cuadros Blazquez, 2001), los efluentes de un matadero, a través de los parámetros característicos como el pH, la demanda química de oxígeno (DQO), la DBO₅, así como los sólidos totales, acidez y alcalinidad (ALPHA, 1992), para en otra fase posterior diseñar un digestor anaerobio que trate estos residuos y obtener los rendimientos de metano generados y la eliminación en materia orgánica, mediante como DQO. Nuestro último fin será diseñar un prototipo de biodigestor para la cogeneración de electricidad y calor a partir de estos residuos.

2.2 Marco legal

a) Ley N° 28611.- Ley general del ambiente

“Artículo 31°. - Del Estándar de Calidad Ambiental.

31.1 El Estándar de Calidad Ambiental - ECA es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos. (...).”

“Artículo 121°. - Del vertimiento de aguas residuales.

El Estado emite en base a la capacidad de carga de los cuerpos receptores, una autorización previa para el vertimiento de aguas residuales domésticas, industriales o de cualquier otra actividad desarrollada por personas naturales o jurídicas, siempre que dicho vertimiento no cause deterioro de la calidad de las aguas como cuerpo

receptor, ni se afecte su reutilización para otros fines, de acuerdo a lo establecido en los ECA correspondientes y las normas legales vigentes.”

“Artículo 122°. - Del tratamiento de residuos líquidos.

122.1 Corresponde a las entidades responsables de los servicios de saneamiento la responsabilidad por el tratamiento de los residuos líquidos domésticos y las aguas pluviales.

122.3 Las empresas o entidades que desarrollan actividades extractivas, productivas, de comercialización u otras que generen aguas residuales o servidas, son responsables de su tratamiento, a fin de reducir sus niveles de contaminación hasta niveles compatibles con los LMP, los ECA y otros estándares establecidos en instrumentos de gestión ambiental, de conformidad con lo establecido en las normas legales vigentes. El manejo de las aguas residuales o servidas de origen industrial puede ser efectuado directamente por el generador, a través de terceros debidamente autorizados a través de las entidades responsables de los servicios de saneamiento, con sujeción al marco legal vigente sobre la materia.”

b) Ley N° 29338.- Ley de recursos hídricos

“Artículo 15°. - Funciones de la Autoridad Nacional.

(...) 4. Elaborar el método y determinar el valor de las retribuciones económicas por el derecho de uso de agua y por el vertimiento de aguas residuales en fuentes naturales de agua, valores que deben ser aprobados por decreto supremo; así como aprobar las tarifas por uso de la infraestructura hidráulica, propuestas por los operadores hidráulicos. 7. Otorgar, modificar y extinguir, previo estudio técnico, derechos de uso de agua, así como aprobar la implementación, modificación y extinción de servidumbres de uso de agua, a través de los órganos desconcentrados de la Autoridad Nacional.”

“Artículo 76°. - Vigilancia y fiscalización del agua.

La Autoridad Nacional en coordinación con el Consejo de Cuenca, en el lugar y el estado físico en que se encuentre el agua, sea en sus cauces naturales o artificiales, controla, supervisa, fiscaliza el cumplimiento de las normas de calidad ambiental del agua sobre la base de los Estándares de Calidad Ambiental del Agua (ECA-Agua) y las disposiciones y programas para su implementación establecidos por autoridad del ambiente. También establece medidas para prevenir, controlar y remediar la contaminación del agua y los bienes asociados a esta. Asimismo, implementa actividades de vigilancia y monitoreo, sobre todo en las cuencas donde existan actividades que pongan en riesgo la calidad o cantidad del recurso.”

“Artículo 79°. - Vertimiento de agua residual.

La Autoridad Nacional autoriza el vertimiento del agua residual tratada a un cuerpo natural de agua continental o marina, previa opinión técnica favorable de las Autoridades Ambiental y de Salud sobre el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental del Agua (ECA-Agua) y Límites Máximos Permisibles (LMP). Queda prohibido el vertimiento directo o indirecto de agua residual sin dicha autorización.

En caso de que el vertimiento del agua residual tratada pueda afectar la calidad del cuerpo receptor, la vida acuática asociada a este o sus bienes asociados, según los estándares de calidad establecidos o estudios específicos realizados y sustentados científicamente, la Autoridad Nacional debe disponer las medidas adicionales que hagan desaparecer o disminuyan el riesgo de la calidad del agua, que puedan incluir tecnologías superiores, pudiendo inclusive suspender las autorizaciones que se hubieran otorgado al efecto. En caso de que el vertimiento afecte la salud o modo de vida de la población local, la Autoridad Nacional suspende inmediatamente las autorizaciones otorgadas.

Corresponde a la autoridad sectorial competente la autorización y el control de las descargas de agua residual a los sistemas de drenaje urbano o alcantarillado.”

“Artículo 80°. - Autorización de vertimiento.

Todo vertimiento de agua residual en una fuente natural de agua requiere de autorización de vertimiento, para cuyo efecto debe presentar el instrumento ambiental pertinente aprobado por la autoridad ambiental respectiva, el cual debe contemplar los siguientes aspectos respecto de las emisiones:

1. Someter los residuos a los necesarios tratamientos previos.
2. Comprobar que las condiciones del receptor permitan los procesos naturales de purificación.

La autorización de vertimiento se otorga por un plazo determinado y prorrogable, de acuerdo con la duración de la actividad principal en la que se usa el agua y está sujeta a lo establecido en la Ley y en el Reglamento.”

“Artículo 82°. - Reutilización de agua residual.

La Autoridad Nacional, a través del Consejo de Cuenca, autoriza el reúso del agua residual tratada, según el fin para el que se destine la misma, en coordinación con la autoridad sectorial competente y, cuando corresponda, con la Autoridad Ambiental Nacional. El titular de una licencia de uso de agua está facultado para reutilizar el agua residual que genere siempre que se trate de los mismos fines para los cuales fue otorgada la licencia. Para actividades distintas, se requiere autorización. La distribución de las aguas residuales tratadas debe considerar la oferta hídrica de la cuenca.”

“Artículo 83°. - Prohibición de vertimiento de algunas sustancias.

Está prohibido verter sustancias contaminantes y residuos de cualquier tipo en el agua y en los bienes asociados a ésta, que representen riesgos significativos según los criterios de toxicidad, persistencia o

bioacumulación. La Autoridad Ambiental respectiva, en coordinación con la Autoridad Nacional, establece los criterios y la relación de sustancias prohibidas.

“Artículo 135°. - Prohibición de efectuar vertimientos sin previa autorización.

135.1 Ningún vertimiento de aguas residuales podrá ser efectuado en las aguas marítimas o continentales del país, sin la autorización de la Autoridad Nacional del Agua.

135.2 En ningún caso se podrá efectuar vertimientos de aguas residuales sin previo tratamiento en infraestructura de regadío, sistemas de drenaje pluvial ni en los lechos de quebrada seca.” *“Artículo 137°.- Otorgamiento de autorizaciones de vertimientos de aguas residuales tratadas.*

137.1 La Autoridad Nacional del Agua otorga autorizaciones de vertimientos de aguas residuales tratadas con las opiniones previas técnicas favorables de la Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud y de la autoridad ambiental sectorial competente de acuerdo al procedimiento que, para tal efecto, establece dicha Autoridad.

2.2.1 Decretos

REGLAMENTO DE LA LEY N° 29338 - LEY DE RECURSOS HÍDRICOS, APROBADO POR DECRETO SUPREMO N° 001-2010-AG

“Artículo 131°. - Aguas residuales y vertimientos.

Para efectos del Título V de la Ley se entiende por: a. Aguas residuales, aquellas cuyas características originales han sido modificadas por actividades antropogénicas, tengan que ser vertidas a un cuerpo natural de agua o reusadas y que por sus características de calidad requieren de un tratamiento previo. b. Vertimiento de aguas residuales, es la descarga de aguas residuales previamente tratadas,

en un cuerpo natural de agua continental o marítima. Se excluye las provenientes de naves y artefactos navales.”

“Artículo 133°. - Condiciones para autorizar el vertimiento de aguas residuales tratadas.

133.1 La Autoridad Nacional del Agua podrá autorizar el vertimiento de aguas residuales únicamente cuando:

- a. Las aguas residuales sean sometidas a un tratamiento previo, que permitan el cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles – LMP.
- b. No se transgredan los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua, ECA - Agua en el cuerpo receptor, según las disposiciones que dicte el Ministerio del Ambiente para su implementación.
- c. Las condiciones del cuerpo receptor permitan los procesos naturales de purificación.
- d. No se cause perjuicio a otro uso en cantidad o calidad del agua.
- e. No se afecte la conservación del ambiente acuático.
- f. Se cuente con el instrumento ambiental aprobado por la autoridad ambiental sectorial competente.
- g. Su lanzamiento submarino o subacuático, con tratamiento previo, no cause perjuicio al ecosistema y otras actividades lacustre, fluviales o marino costeras, según corresponda.

2.3 Marco conceptual.

- **Procesos de oxidación avanzada:** (AOPs “Advanced Oxidation Processes”) son procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes (O. Legrini, 1993).
- **Agua residual:** Las aguas residuales de matadero tienen un contenido en materia orgánica, en su composición predominan las proteínas y las grasas, (Ramalho, 2003).
- **Sólidos totales:** Materia que se obtiene como residuo después de someter al agua a un proceso de evaporación a entre 103° y 105°C (Bhojwani, 1990).

- **Densidad:** Característica física importante del agua residual dado que de ella depende la potencial formación de corrientes de densidad en instalaciones de tratamiento (Field, 1990).
- **Turbiedad:** Se emplea para indicar la calidad de las aguas vertidas o de las aguas naturales en relación con la materia coloidal y residual en suspensión (Field, 1990).
- **Bacterias:** Las bacterias son protistas unicelulares. Consumen solubles por lo que se encuentran en donde estén estos y exista humedad (Field, 1990).
- **DQO:** Es una medida del material fácilmente degradable en un efluente. Se obtiene midiendo el oxígeno consumido por los microorganismos aerobios, cuando un volumen conocido de efluente se añade a un volumen conocido de agua saturada de oxígeno y se incubaba a 20°C durante cinco días. Se expresa en mg O₂/l. (Moreno, 2006).
- **Radiación:** Se conoce como radiación al proceso físico por medio del cual se transmite energía en formas de ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz (300,000 Km. /s). No requiere de algún medio para su propagación. La luz es una de las formas de energía radiante que nuestros sentidos pueden percibir directamente. La otra forma es la energía calórica infrarroja. Sin embargo hay diversas manifestaciones de la radiación, dependiendo de la longitud de onda de esta (Mills & Hunte, 1997).
- **Aceites y Grasas:** Sustancias orgánicas no miscibles en agua y de bajo peso específico, lo que hace que floten. Solubles en solventes orgánicos. Obstruyen tuberías, bombas y tamices. (Moreno, 2006).
- **Sólidos en Suspensión (SS):** Materia insoluble suspendida en el agua. Está constituida tanto por componentes orgánicos como inorgánicos. En las aguas residuales de mataderos predominan los primeros. Con el tiempo, la materia orgánica será degradada y ello aumentará la DBO de las aguas receptoras. Se expresan en m/L. (Moreno, 2006).

2.4 Marco teórico.

2.4.1 Aguas residuales de camales

Los efluentes de los mataderos, contienen: sangre, estiércol, pelo, grasas, huesos, proteínas y otros contaminantes solubles. La

composición de los efluentes dependerá del proceso de producción y de los pre-tratamientos en las descargas de cada proceso. (Da Cámara L., 2000).

En general los efluentes tienen altas concentraciones de compuestos orgánicos y nitrógeno; la relación promedio de DQO: DBO₅: N es de 12:4:1.

Los residuos líquidos son generados en:

- Los corrales de reposo, por aguas de lavado, materia fecal y orina, del ganado.
- Área de desangrado.
- Operaciones de remoción de cueros, pelo y otras partes comestibles.
- Procesamiento de la carne, vísceras e intestinos: estas aguas pueden contener sangre, grasas, fango, contenido intestinal, pedazos de carne, pelo y desinfectantes.
- La operación de trozado de la carne genera sólidos que caen al piso, que se adhieren a cuchillos y equipos, los que luego son eliminados en la operación de limpieza.

2.4.1.1 Componentes de las Aguas Residuales de Camales

Los efluentes generados en el faenamiento vacuno son principalmente aguas de lavado, con contenidos de sangre y algunas partículas gruesas de cueros y huesos: en el caso de procesamiento de cerdos, son aguas calientes con gran cantidad de pelo. Se debe tener muy en cuenta el análisis de las siguientes sustancias: DBO₅, pH, Sólidos suspendidos, Sólidos sedimentables, Aceites y grasas, Coliformes fecales de animales, Color, Otros. (Cairncross, 1990).

a) Sólidos

En las aguas residuales se encuentra todo tipo de sólidos, distinguiéndose entre ellos orgánicos e inorgánicos. Los sólidos orgánicos son sustancias que contienen carbón, hidrógeno y

oxígeno, pudiendo alguno de estos elementos combinarse con nitrógeno, azufre o fósforo. Los principales grupos lo conforman las proteínas, los carbohidratos y las grasas, susceptibles todos a ser degradados por medio de bacterias y organismos vivos que son combustibles es decir que pueden ser quemados. Los sólidos inorgánicos son sustancias inertes y no susceptibles a ser degradados, designándose comúnmente como minerales. Dentro de estos se incluye arenas, aceites y sales minerales disueltas. (Méndez L, 2004).

b) Gases disueltos

Las aguas residuales contienen pequeñas y variadas concentraciones de gases disueltos. Entre los más importantes de estos se encuentran el oxígeno, el cual está presente en el agua en su estado original, así como también disuelto en el aire que está en contacto con la superficie del líquido. Este oxígeno, generalmente denominado oxígeno disuelto, es un factor muy importante en el tratamiento de las aguas residuales ya que puede producir Biogás. Se encuentra también presente en las aguas residuales otros gases como anhídrido carbónico, resultante de la descomposición de materia orgánica, nitrógeno disuelto de la atmósfera y sulfuro de hidrógeno de compuestos de azufre tanto orgánico como inorgánico.

c) Turbiedad

Es una medida de las propiedades de dispersión de la luz de las aguas. Sirve principalmente para conocer la cantidad de luz que es absorbida o disipada por el material suspendido en el agua.

La turbiedad en el agua se da debido a la desintegración y la erosión de materiales arcillosos, limos o rocas, pero también de residuos industriales, productos de corrosión, así como también

por los restos de plantas y microorganismos. La presencia de detergentes y jabones en las aguas residuales causan de igual forma un aumento en la turbiedad del agua. La medición de la turbiedad se lo realiza por la comparación entre la intensidad de luz dispersa en una muestra por una suspensión de referencia bajo las mismas condiciones.

Los resultados de las mediciones de turbiedad se dan en unidades nefelométricas de turbiedad (UNT). (Clair N. SawyerR, 2000).

d) Color

El color en aguas residuales es causado por sólidos suspendidos, material coloidal y sustancias en solución. El color causado por sólidos suspendidos se denomina color aparente, mientras que el causado por sustancias disueltas y coloidales se denomina color verdadero. El color verdadero se obtiene sobre una muestra filtrada. El color de una muestra de agua residual se determina comparando el color de la muestra y el color producido por soluciones de diferente concentración de cloroplatinato de potasio. Una unidad de color corresponde al color generado por 1 mg/L de platino. El color de las aguas residuales se debe a la infiltración en sistemas de recolección, descargas industriales y la descomposición de compuestos orgánicos. Existen valores cualitativos para estimar la condición general del agua residual, en la siguiente tabla se muestra dichos valores.

Tabla 1 Condición General del Agua Residual.

Color	Descripción
Café claro	El agua lleva 6 horas después de la descarga.
Gris claro	Aguas que han sufrido algún grado de descomposición o que han permanecido un tiempo corto en los sistemas de recolección.
Gris oscuro o negro	Aguas sépticas que han sufrido una fuerte descomposición bacteria bajo condiciones anaerobias.

(Koshkin N, 2007).

e) Temperatura

La temperatura del agua residual es por lo general mayor que la temperatura del agua para abastecimiento como consecuencia de la incorporación de agua caliente proveniente de múltiples usos. La medición de temperatura es de suma importancia debido a que la mayoría de los sistemas de tratamiento de aguas residuales incluyen procesos biológicos que dependen de la temperatura. Es un parámetro muy importante ya que afecta directamente las reacciones químicas y las velocidades de reacción, la vida acuática y la adecuación del agua para fines benéficos. Cuando la temperatura del agua es baja, el crecimiento y la reproducción de microorganismos son bajos también.

2.4.2 Procesos de oxidación avanzada (POA'S)

Los procesos de oxidación avanzada son empleados en la remoción de agentes contaminantes de aguas en pequeña y mediana escala (Marronquin V., 2014), así como para descontaminación del aire, suelo y por inhibición de bacterias y virus.

Los POA's se basan principalmente en procesos capaces de producir cambios en la estructura química de los contaminantes. El uso de especies oxidantes como el radical hidroxilo (HO^*), que puede ser generado por medios fotoquímicos. (Ramirez, 2013), son procesos de tratamiento terciario que están basados en la generación y uso de especies oxidantes transitorias poderosas, que llevan a cabo la mineralización de contaminantes orgánicos principalmente por el radical hidroxilo (OH^*). Estos radicales son capaces de oxidar compuestos orgánicos principalmente por abstracción de hidrógeno o por adición electrofílica a dobles enlaces generándose radicales orgánicos libres (R^*). Estos reaccionan a su vez con moléculas de oxígeno formando un peroxiradical, iniciándose una serie de reacciones de degradación oxidativa que pueden conducir a la completa mineralización del contaminante.

Los PAOs son útiles como pretratamiento para contaminantes resistentes a la biodegradación antes de un tratamiento biológico o como *pos-tratamiento* para efectuar una disminución de la carga orgánica de las aguas antes de la descarga a las comunidades. (Muszkat, Raucher, & Magaritz, 1994).

Muchos de los beneficios que estos procesos tienen es que no dejan remanentes, todos los contaminantes orgánicos peligrosos se descomponen, incluso hasta alcanzan una mineralización completa dando como productos finales dióxido de carbono, agua y sales. En muchos casos los hidrocarburos clorados que son resistentes a la biodegradación, pueden ser efectivamente mineralizados de esta forma. (Malato & Blanco, 2002).

El principal inconveniente de los PAOs es su elevado costo por el uso de reactivos químicos y/o elevado consumo energético (lámparas para generar radiación UV). Por ende, entre todos los PAOs aquellos que aprovechan la radiación solar son de especial

interés, ya que se elimina el consumo de energía mediante lámparas, substituyéndolas por esta radiación. Entre estos procesos se encuentra la fotocatalisis solar (homogénea o heterogénea) la cual se ha convertido en la actualidad en una de las más exitosas aplicaciones de la fotoquímica solar. (Malato & Blanco, 2002).

2.4.2.1 Los POA's comprenden los siguientes procesos:

- a) No fotoquímicos:** En los cuales se encuentran: la ozonización en medio alcalino, ozonización con peróxido de hidrogeno, proceso Fenton, oxidación electroquímica, radiolisis gamma y tratamiento con haces de electrones, plasma no térmico y ultrasonidos.
- b) Fotoquímicos:** Aquí se encuentran relacionados aquellos métodos que utilizan de una manera u otra la luz, como son oxidación de agua sub y supercrítica, fotolisis del agua en el ultravioleta al vacío (UVV), UV con ozono, UV con peróxido de hidrogeno, procesos Foto Fenton y fotocatalisis heterogénea. (Jaramillo, 2006).

Se pueden enumerar los siguientes objetivos (García-Montaña & Ruiz , 2006).

- Mineralización de los contaminantes, especialmente los compuestos orgánicos recalcitrantes, hasta su completa transformación en dióxido de carbono, agua y aniones inorgánicos, evitando la formación de subproductos o residuos.
- Degradación de contaminantes orgánicos en compuestos más biodegradables y/o menos tóxicos.
- Eliminación de olor y/o color.
- Desinfección.

Cabe remarcar que la calidad del efluente final puede permitir su reciclaje y reutilización dentro de la propia industria, con lo que es posible solucionar el problema de vertidos de una forma económica y ambientalmente viable (García-Montaña & Ruiz , 2006).

Una de las posibles clasificaciones de los PAOs se puede dar en función de la fuente de generación de la especie oxidante, es decir, el método para generar los radicales hidroxilos. Esta clasificación se muestra en el esquema de la Tabla 2, donde se recogen los principales tipos de PAOs según sean fotoquímicos o no fotoquímicos. La amplia variedad de técnicas disponibles evidencia la versatilidad de los mismos (García-Montaña & Ruiz , 2006).

Tabla 2 Clasificación de muestras

Procesos no fotoquímicos	Procesos fotoquímicos
Ozonización en medio alcalino (O_3/OH^{\cdot})	Fotólisis en el ultravioleta de vacío (UUV)
Ozonización con peróxido (O_3/H_2O_2)	UV/ peróxido de hidrógeno UV/ O_3
Procesos Fenton (Fe(II)/ H_2O_2)	Foto-Fenton (Fe(II)/ H_2O_2 /UV)
Oxidación electroquímica	Fotocatálisis
Oxidación sub y supercrítica	
Plasma no térmico	
Ultrasonido	

(García-Montaña & Ruiz , 2006)

2.4.2.2 Ventajas y desventajas

a) Ventajas

- Modifican y disocian químicamente los contaminantes hasta llegar a la mineralización y/o degradación.
- No forman subproductos que demanden un proceso posterior.

- Son muy útiles para contaminantes reacios que resisten otros tratamientos.
- Mejoran la biodegradabilidad.
- Son utilizados antes de un tratamiento biológico.
- Las condiciones de operación son fáciles de aplicar.
- Se utilizan para el tratamiento de contaminantes a baja concentración.
- Consumen mucho menos energía que otros métodos.
- Optimizan las características del agua a ser tratada.

b) Desventajas

- Dificultad de escoger el método específicamente cuando se trata de mezclas complejas.
- No se aplican cuando las concentraciones de los contaminantes son altas.
- La materia orgánica puede interferir en la técnica.

2.4.3 Fotocatálisis heterogénea

(Domènech, Jardim, & Litter, 2012), definen a la fotocatalisis heterogénea como un método utilizado como alternativa a las tecnologías habituales por la producción de radicales HO* el cual puede atacar a cualquier molécula orgánica y convertirla en compuestos inertes de manera segura e indiscriminadamente.

El radical HO* tiene un alto poder de oxidación $E_0 = 2,8 \text{ V}$ en comparación al Cloro, al peróxido de hidrógeno e incluso al O₃ cuyos valores son de 1,36; 1,78 y 2,07 respectivamente brindando una velocidad de reacción superior con respecto a la oxidación de las sustancias orgánicas.

En este tipo de reacción catalítica, un catalizador (semiconductor) de banda ancha absorbe energía radiante proveniente del espectro solar

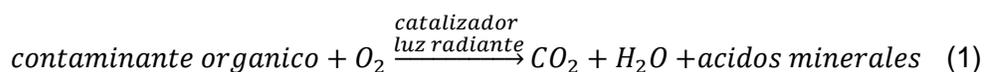
con longitudes de onda de 300 nm o proveniente de alguna fuente de iluminación artificial.

Muchas son las especies de catalizadores utilizados, entre ellos el ZnO, Al₂O₃, FeO₃ y TiO₂, que son de cómoda adquisición, reaccionan fácilmente con la luz UV y se encuentran en el medio ambiente, interviniendo en procesos químicos naturales.

Los estudios se han centrado en los óxidos metálicos como es el caso del TiO₂ por poseer superior equilibrio químico. Una de las particularidades más relevantes de estos catalizadores es que no son solubles en los ámbitos químicos en los cuales provoca la transición y forman una fase distinta cuyo estado de agregación generalmente es sólido, dando como resultado dos fases.

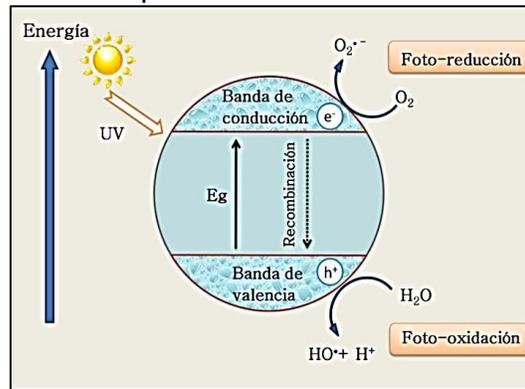
La región de contacto donde se desarrollan las foto-reacciones (banda de interfaz) entre el sólido (semiconductor TiO₂) estimulado y la solución donde se encuentran moléculas que todavía no han sido transformadas se alcanza la mineralización y degradación de muchas sustancias orgánicas contaminantes (Jaramillo Páez & Taborda Ocampo, 2006).

El catalizador no se alterará químicamente durante la reacción.



El semiconductor se puede activar por excitación continua del mismo, absorbiendo los fotones que van a ser utilizados en el proceso o por estimulación de las moléculas absorbidas en la superficie del catalizador y que transfieren los electrones al semiconductor (Gómez, Urkiada, & Gutiérrez, 2000).

Figura 1 Reacciones en la interface semiconductor – analito en presencia de luz UV



(Gómez, Urkiada, & Gutiérrez, 2000)

2.4.4 Fotocatálisis homogénea

En la fotocatalisis homogénea todas las especies cinéticamente activas incluyendo al catalizador constituyen una misma fase. En este proceso catalítico el oxidante (H_2O_2 , O_3), y el catalizador (sales de Fe_{2+}) están en disolución y se basa en la transmisión electrónica entre el catalizador y el agente oxidante. Después de realizar el tratamiento, la separación de los iones de Fe en solución presenta inconvenientes.

Uno de los AOPs que se ha desarrollado con buenas perspectivas es el proceso Foto-Fenton. Mediante la absorción de la energía solar por medio de sales hierro y en presencia de peróxido de hidrógeno, se inicia la generación de radicales OH^{\bullet} , especie capaz de oxidar la materia orgánica disuelta en el agua a tratar.

2.4.5 Mecanismo Fenton y Foto Fenton

En las tecnologías de tratamiento de aguas residuales se han desarrollado procesos amigables con el medio ambiente que están enmarcados en los principios de la química verde con los que se busca reducir los tiempos y costos del tratamiento con una alta eficiencia.

En esta búsqueda se destaca el proceso Fenton, el cual se basa en una reacción propuesta originalmente por Henry J. H. En 1899, esta reacción fue planteada para la oxidación de ácido tartárico y ahora se conoce como "proceso Fenton."

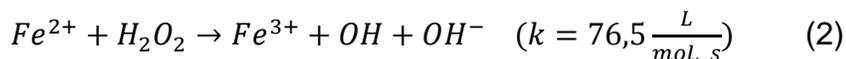
El proceso Fenton se basa en la combinación de peróxido de hidrogeno y Fe^{2+} (o Fe^{3+}) que actúa como catalizador, para la formación de radicales HO^* . Esta reacción puede tener variaciones, como el uso de radiación UV, proceso que es llamado Foto Fenton que en comparación con el método Fenton convencional o la fotólisis UV puede tener una mayor eficiencia en la degradación de contaminantes orgánicos, este incremento en la velocidad de reacción es atribuido principalmente a la foto-reducción de los iones Fe (Gonzales, Presa, Latorre, & Lura, 2007).

La reacción Fenton, llamada así por el nombre de la persona que la desarrolló, utiliza una mezcla de peróxido de hidrógeno que va a actuar como oxidante y el sulfato ferroso (catalizador), a presión atmosférica y temperatura entre 20 – 40 °C. Para lograr la degradación de compuestos orgánicos se provoca:

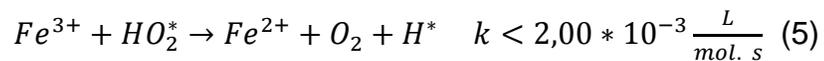
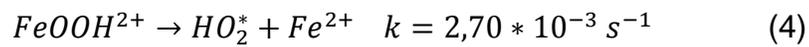
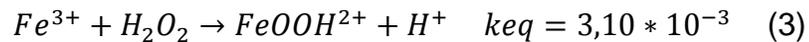
- Una variación en la estructura de las sustancias orgánicas.
- Una oxidación parcial que incita a una disminución de la toxicidad.
- Una oxidación total de los compuestos orgánicos que permiten la utilización del material íntegramente sin necesidad de ejecutar otro proceso adicional.

2.4.5.1 Proceso de Fenton

La generación de radical hidroxilo tiene lugar al combinar peróxido de hidrógeno y una sal de hierro (II), mezcla que se denomina reactivo de Fenton. Se trata de una reacción térmica muy rápida, se omiten los ligando del agua en las reacciones:



El ión Fe (III) puede reducirse por reacción con H₂O₂ y formar de nuevo ión Fe (II) y más radical hidroxilo. Este segundo proceso se denomina Fenton-like. Es más lento que el proceso de Fenton, y permite la regeneración de Fe (II). El mecanismo global resulta de carácter catalítico. Para ello, es necesario que el peróxido se encuentre en exceso respecto a la cantidad de hierro añadida. (García-Montaña & Ruiz , 2006).



a) Proceso Fenton a nivel industrial

En el proceso de Fenton a nivel industrial ha de tenerse en consideración el equipamiento necesario para que pueda tener lugar la reacción. Generalmente, se parte de un reactor principal que es donde tiene lugar el proceso de Fenton en modo discontinuo (modo Batch). El reactor Batch consiste en un depósito no presurizado, el cual mantiene las condiciones atmosféricas, y que dispone de una serie de bombas externas para poder adicionar el agente para el ajuste de pH (ya sea ácido o base), y dosificar el sulfato de hierro (II) y el peróxido de hidrógeno (35-50%) en disolución. (Zapata, 2011).

Se recomienda que dicho reactor esté provisto de una capa interna que lo proteja, ya que la reacción de Fenton es muy agresiva y puede provocar la corrosión del mismo. También ha de estar provisto de una camisa exterior, por si fuese necesario aumentar o reducir la temperatura del reactor.

La adición de los reactivos se lleva a cabo de la siguiente manera: el agua residual seguida del ácido o la base para ajustar el pH, el cual debe ser añadido muy poco a poco para no alterar la temperatura interna. A continuación, se añade el reactivo Fenton, cantidad óptima necesaria para el proceso. Una vez transcurrido el tiempo de reacción, y habiendo alcanzado el nivel de degradación oportuno, se pasa el agua residual a un tanque de neutralización para adicionar una base y, de esta manera, precipitar el hidróxido de hierro. Éste se hace coagular en un tanque de floculación mediante un agente coagulante. Una vez separadas estas dos fases ya se obtendrá un efluente tratado. (Blanco, 2009).

2.4.5.2 Proceso Foto Fenton

Las tecnologías avanzadas de oxidación TAOS se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes. Estos procesos involucran la generación y uso de especies transitorias poderosas, principalmente el radical hidroxilo. Este radical puede ser generado por medios fotoquímicos (incluida la luz solar) o por otras formas de energía, y posee alta efectividad para la oxidación de materia orgánica. (Aznate, Cerro, & Orozco, 2013).

Entre las diferentes técnicas avanzadas de oxidación disponibles, se destaca el proceso Foto Fenton. Este tipo de proceso es un claro ejemplo de procesos foto catalíticos homogéneos ya que el catalizador y las diferentes especies reactivas se encuentran en el mismo estado físico. (Sirtori, 2010). En la reacción Fenton se lleva a cabo la oxidación del Fe (II) a Fe (III) a través de la reacción entre Fe (II) disuelto y el H₂O₂ en una solución acuosa ácida y que conlleva a la formación del radical hidroxilo (OH^{*}). La reacción es espontánea y puede ocurrir en ausencia de luz.

a) **Mecanismo Foto Fenton** : Durante el proceso de fotocatalisis homogénea Foto Fenton el ion de Fe(III) se oxida a Fe(II) descomponiendo el peróxido de hidrógeno para formar radicales hidroxilo ecuación (6) el empleo de la radiación UV-Vis incrementa el poder de oxidación principalmente por la foto-reducción de Fe(III) a Fe(II) la cual produce más radicales ecuación (7) hidroxilo y de esta forma se establece un ciclo en el reactivo de Fenton y se producen los radicales hidroxilo para la oxidación de compuestos orgánicos; adicionalmente es posible usar la radiación solar, lo que eliminaría el costo de la radiación UV. (Aznate, Cerro, & Orozco, 2013).

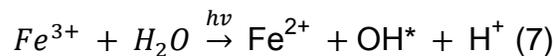
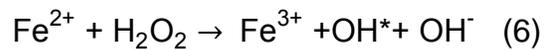
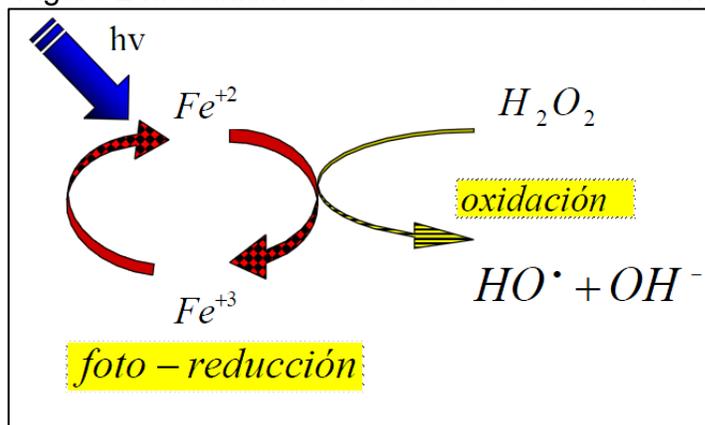


Figura 2 Mecanismo de reacción de Foto Fenton

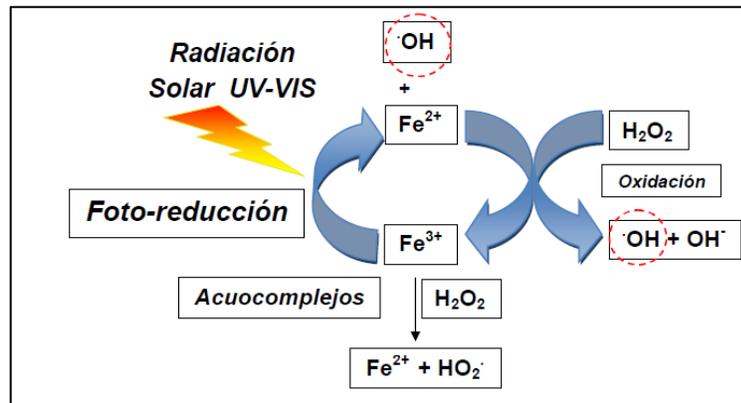


(Hincapie, Ocampo, Restrepo, & Marin, 2011)

La velocidad de la reacción Fenton se incrementa de manera sustancial, al hacer incidir sobre la solución, radiación de una adecuada longitud de onda (180-580 nm), que es luz UV y visible, este tipo de reacción foto-asistida se denomina reacción

Foto Fenton. El efecto de la irradiación de la luz en la ecuación 1 muestra la regeneración del ion ferroso por la foto reducción de los acuocomplejos del ion férrico ($[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})]^{2+}$), los cuales de manera simultánea llevan a la generación adicional de radical hidroxilo. A su vez este ion ferroso generado reacciona con H_2O_2 iniciándose un ciclo con la ecuación 6 dando como resultado la producción de radicales hidroxilos adicionales (Figura 3) que oxidaran los contaminantes. La principal ventaja del proceso Foto Fenton es la absorción de luz con longitud de onda de hasta 580 nm que comprende el 35% del espectro solar. (Fernando Garcés, & Mejia Franco, 2002).

Figura 3 Esquema del ciclo catalítico de la reacción Foto Fenton



(Domènech, Jardim, & Litter, 2012)

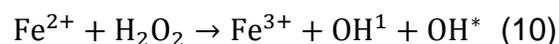
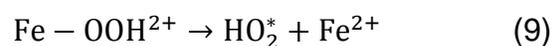
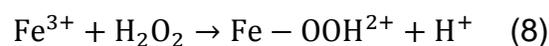
El proceso Foto Fenton ha sido efectivo en la degradación de compuestos alifáticos y aromáticos clorados, PCBs, nitroaromáticos, colorantes azo. Es un buen oxidante de herbicidas y otros contaminantes de suelos tales como n-hexadecano o Dieldrin. Puede descomponer solventes para limpieza y decolorar aguas residuales con distintos tipos de colorantes y otros residuos industriales, reduciendo su DQO.

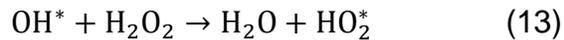
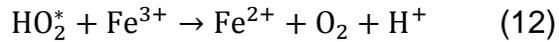
También se ha aplicado exitosamente en la reducción de DQO de aguas municipales y subterráneas y en el tratamiento de lixiviados. Es útil como pre-tratamiento de compuestos no biodegradables. (Muszkat, Raucher, & Magaritz, 1994).

b) Parámetros que influyen en el proceso: Los principales parámetros que influyen en el proceso foto-Fenton son:

- **pH:** Este proceso presenta una actividad catalítica máxima a pH próximos a 3. El pH influye en la generación de radicales OH^* y por tanto, en la eficiencia de la oxidación. (Acosta, 2009).

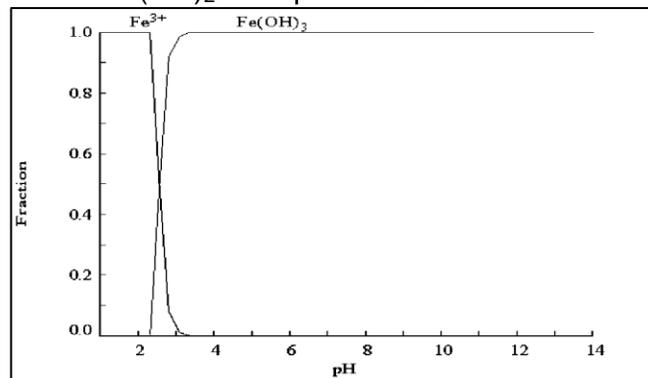
Para valores del pH por encima de 4, la degradación disminuye drásticamente, aparecen precipitadas de hidróxido de hierro y disminuye la cantidad de Fe^{2+} disponible. (Madrid & Galvis, 2007), para pH excesivamente bajos ($\text{pH} < 2,0$), y a partir del Fe (II) se produce la formación de $\text{Fe}(\text{OOH})^{2+}$ que reacciona muy lentamente con el H_2O_2 obstaculizando la generación de OH^* (Aguirre, 2010). En rangos de pH mayores a 5, se produce la precipitación de hidróxido férrico y la descomposición del peróxido de hidrogeno, disminuyendo el rendimiento de la reacción o incluso inactivándose. En rangos de pH menores a 3, la reacción es autocatalítica porque el Fe (III) descompone el peróxido en O_2 y HO_2 , esta descomposición del reactivo se produce mediante un mecanismo de reacción en cadena a través de las reacciones (8) a (13):





El sistema Fenton, como se ha comentado anteriormente, depende del pH del medio de reacción. La velocidad de las reacciones tiende a ser máxima en un pH cercano a 2,8. El valor óptimo se encuentra entre 2,5 y 2,8; donde el Fe (III) existe en solución mayoritariamente como $\text{Fe}(\text{OH})_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})_5$. A pH altos, la velocidad disminuye debido a la precipitación de hierro en forma de $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

Figura 4 Diagrama de fracción de las especies de Fe (III) y $\text{Fe}(\text{OH})_2$ en equilibrio a 25 °C



(Blanco, 2009)

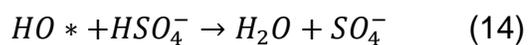
A pH excesivamente bajos (pH < 2,0), y a partir del Fe (II) se produce la formación de $\text{Fe}(\text{OOH})^{2+}$ que reacciona muy lentamente con el H_2O_2 obstaculizando la generación de OH^* . Además, disminuye el coeficiente de absorción de los complejos de hierro.

Este grupo de reacciones requiere, por tanto, un control riguroso del pH.

- **Concentración de H_2O_2** : La velocidad de degradación aumenta con la cantidad de H_2O_2 dosificado debido a la mayor producción de radicales OH^* . No obstante, a partir de una determinada cantidad de H_2O_2 , la velocidad de reacción puede verse afectada negativamente debido posiblemente a la auto descomposición del H_2O_2 en oxígeno y agua. La concentración a tratar y de la naturaleza y concentración del compuesto a tratar y de la concentración de Fe (II) en el sistema. (Katitha & Palanivelu, 2005).
- **Concentración de Fe (III)**: Puesto que el hierro actúa como catalizador en la reacción de Foto Fenton, la velocidad de degradación de las moléculas orgánicas suele ser mayor a medida que aumenta la concentración de hierro, pero a partir de una determinada concentración de hierro disminuye la eficiencia de la reacción. Esto puede deberse al aumento de la turbidez de la disolución, lo que dificulta la absorción de la luz necesaria para la realización del proceso Foton Fenton, o a la reacción del Fe^{2+} con radicales OH^* . Por tanto, la relación $H_2O_2-Fe^{2+}$ debe ser optimizada, evitando así la recombinación de los radicales OH^* . Y la producción de una excesiva precipitación de complejos de Fe^{3+} , los cuales, con el control del pH se logra retardar, ya que precipitan a $pH \geq 6$.
- **Concentración de aniones inorgánicos**: La presencia de ciertos iones inorgánicos tiene un notable efecto inhibitorio sobre la cinética de degradación de contaminantes mediante el proceso de Foto Fenton. Estos iones (fosfato, sulfato, fluoruro, bromuro y cloruro) pueden formar parte de las aguas o generarse durante la propia degradación de los compuestos orgánicos. La influencia negativa de estas especies puede deberse a la formación de ciertos complejos de hierro menos activos, a la reacción con los radicales hidroxilos

presentes para dar lugar a otros radicales menos reactivos (inhibición de la acción de iones hidroxilos), o a la precipitación de los mismos con los iones hierro disueltos. No obstante, el efecto negativo sobre la cinética de la reacción depende de la concentración de estos iones en disolución.

Ciertos aniones inorgánicos actúan como inhibidores de la acción de los radicales OH* o forman especies no reactivas con el hierro. Algunos estudios han mencionado la disminución de la velocidad del proceso debido a la presencia en altas concentraciones de fluoruros y sulfatos (F⁻, SO₄²⁻), ya que reducen la reactividad del Fe(III) a través de mecanismos de coordinación y secuestrando radicales hidroxilo; bromuros y cloruros (Br⁻, Cl⁻), ya que actúan secuestrando los radicales hidroxilos; nitratos (NO₃⁻), percloratos (ClO₄⁻) e hidrogeno fosfatos (H₂PO₄⁻), ya que forman complejos insolubles con el Fe(III) (Pino & Lazo, 2010).



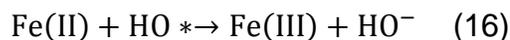
- **Temperatura:** La velocidad de oxidación aumenta con el incremento de temperatura. A presión atmosférica, el rango recomendable de operación es entre 25 y 45 °C. ya que, si se sobrepasa los 50 °C, ocurre una descomposición acelera del peróxido de hidrogeno en oxígeno y agua y la precipitación del hierro en forma de hidróxido debido a que su constante de producto de solubilidad (Kps) disminuye. (Blanco, 2009). La reacción de oxidación Fenton es endotérmica. Operando a presiones de hasta 3 atmósferas se pueden alcanzar temperaturas superiores a los 100 °C sin riesgo de descomposición del peróxido. Este aspecto es muy importante debido a que las industrias textiles tienen una temperatura

elevada en su proceso de producción, por lo que no sería necesario aplicar un aporte energético extra.

- c) Relación Fe (II)/H₂O₂:** La dosis de H₂O₂ influye fundamentalmente sobre la eficacia del proceso mientras que la concentración de hierro afecta a la cinética. Tanto la eficacia como la velocidad de reacción tienden a aumentar con la concentración de reactivos. Sin embargo, un exceso de hierro da lugar a una disminución de la eficacia debido a la activación de reacciones secundarias no deseadas, como es el caso de la formación de Fe (OH)₃ que puede precipitar, por lo que se ha de tener en cuenta la K_{ps} de esta especie para evitarnos este problema. Por otro lado, un exceso de peróxido daría lugar a la degradación del mismo por los radicales hidroxilos la cual es una reacción no deseada.

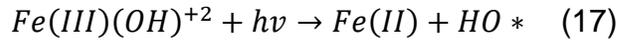
La relación estequiométrica [Fe (II)]/ [H₂O₂] ha sido estudiada por varios autores, debe tenerse en cuenta las características del efluente a tratar. Dependerá del mismo para encontrar la relación adecuada entre Fe(II) y agente oxidante para poder tener la condición más favorable de operación desde el punto de vista técnico, económico y medioambiental (Méndez L, 2004).

- d) Efectos del catalizador:** Las sales de hierro producen descomposición del agua oxigenada y pueden consumir radicales hidroxilos, por lo que un exceso de catalizador perjudica la reacción de oxidación reacción (16). El catalizador se debe dosificar previamente al agua oxigenada, procurando su total disolución.



- e) Efecto de la luz ultravioleta:** En la reacción de Fenton, la generación fotoquímica de los radicales hidroxilos aumenta su

eficiencia ya que la fotólisis de hidroxocomplejos de Fe^{+3} es una fuente adicional de HO^* .



De esta manera el Fe (II) fotogenerado, produce HO^* a través de la reacción (17) continuando el ciclo. La radiación de longitud de onda menor a 360 nm, provee la producción de HO^* por fotólisis del peróxido de hidrogeno (reacción 18):



Algunas investigaciones sugieren que la presencia de bacterias (E-coli, salmonella y shiguella) en la fotodegradación de compuestos dihidroxibencenicos afecta el proceso de manera negativa, haciendo que los porcentajes de degradación sean menores en comparación con los resultados obtenidos en la ausencia de bacterias hasta en un 50%.

2.4.5.3 Mediciones químicas:

Este tipo de mediciones se realizan, con el propósito de observar la disminución de la materia orgánica durante el proceso y determinar la degradación secundaria o mineralización de un contaminante (entre las mediciones a tener en cuenta se tienen:

a) Demanda química de oxígeno (DQO):

La demanda química de oxígeno determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua residual, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo. (Zapata, 2011).

Las sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables presentes en la muestra, se oxidan a CO_2 y agua principalmente mediante refluo en solución fuertemente ácida (H_2SO_4) con un exceso conocido de dicromato de potasio $K_2Cr_2O_7$ en presencia de plata ($HgSO_4$) adicionado para remover la interferencia de los cloruros.

Después de la digestión, el remanente de $K_2Cr_2O_7$ sin reducir se titula con sulfato ferroso de amonio; se usa como indicador de punto final el complejo ferroso de ortofenantrolina (ferroína). La materia orgánica oxidable se calcula en términos de oxígenos equivalente. (Ramalho R, 2003).

Los valores de este parámetro están asociados al grado de avance de la oxidación de los contaminantes, por lo que la determinación seriada de DQO es una herramienta útil de seguimiento del proceso.

b) Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5):

La demanda bioquímica de oxígeno es un parámetro importante en el control de la contaminación del agua. Este dato se utiliza como una medida de la contaminación orgánica, como una base para estimar el oxígeno necesario para los procesos biológicos y como un indicador del rendimiento de los. (López, 2006).

Este parámetro se obtiene mediante una prueba empírica estándar, y mide la cantidad de oxígeno utilizado para la biodegradación de materia orgánica contenida en una muestra. El oxígeno se consume también en la oxidación de materia orgánica como sulfuros o sales ferrosos. La prueba usa un tiempo fijo de incubación; la medición de oxígeno consumido en un periodo de 5 días (DBO_5) es la más comúnmente empleada. El procedimiento es sencillo: se determina el oxígeno disuelto al inicio y al final del tiempo de incubación preestablecida la DBO es simplemente la diferencia entre la concentración inicial y final de oxígeno. (Heinke & Henry, 1999).

CAPÍTULO III

3 PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

3.1 Metodología

3.1.1 Ubicación de efluente del frigorífico FRICACEN S.A.C.

La empresa “Frigorífico Cárnicos del Centro” - FRICACEN S.A.C. se encuentra ubicada en la provincia y distrito de Concepción a $11^{\circ}55'39.28''$ S, $75^{\circ}19'26.30''$ O a 3256 m.s.n.m.

Figura 5 Ubicación geográfica del frigorífico “FRICACEN S.A.C”



Fuente: google Earth

3.1.2 Construcción de una porta lámparas de UV

Se mandó a construir una porta lámpara de ángulos de fierro, con tres tubos fluorescentes de UV de longitud 44 cm cada uno independiente por un interruptor como se muestra en la Figura 6.

Figura 6 Porta lámparas UV



3.1.3 Equipos de prueba de jarras

El equipo de prueba de jarras fue de gran ayuda para poder realizar una mezcla completa de los componentes del proceso Foto Fenton con 100 RPM de cada paleta del equipo de prueba de jarras y en los tiempos programado, se puede observar el equipo utilizado de marca Lovibond de cuatros vasos, como se muestra en la Figura 7.

Figura 7 Equipo de prueba de jarras Lovibond



3.1.4 Tratamiento del agua residual de frigorífico

El agua residual industrial del frigorífico contenía muchos sólidos suspendidos el cual fue necesario de eliminar mediante una filtración física haciendo pasar el líquido mediante una malla Nro. 200 para lo cual se utilizaron recipientes donde transportaríamos las aguas residuales como se muestra en la Figura 8.

Figura 8 Aguas residuales del frigorífico



3.1.5 Preparación del reactivo Foto Fenton

La preparación de los reactivos del proceso Foto Fenton se realizaron de la siguiente manera primero; el sulfato de hierro se pesó a diferentes masas de 50 mg, 100 mg y 200 mg en una balanza analítica de cuatro dígitos (figura 9), como indica en el diseño experimenta, a continuación, se preparó las concentraciones de H_2O_2 de 0,1M; 0,2M y 0,4M mediante disoluciones, como se muestran en las Figuras 9, 10 y 11.

Figura 9 Pesado del sulfato de hierro



Figura 10 Las masas de sulfato de hierro para las pruebas experimentales.



Figura 11 Preparación de concentraciones de H_2O_2



3.1.6 Preparación del H₂O₂

El agua oxigenada comercial tiene una concentración del 30% v/v y su densidad es 1,11g/mL.

Cálculo de la molaridad de la solución: masa de agua oxigenada pura es:

$$m=V*d*(\%/100)$$

Los números de moles son:

$$n=m/MW$$

Remplazando todo en $M=n/V$

Factor de conversión 1000ml=1L

$$M= (d*(\%/100) *1000mL) /MW$$

Remplazando:

$$M= (1,11g/mL*0,3*1000mL/L) /34,02g/mol$$

$$M=9,79mol/L$$

$$M_1*V_1=M_2*V_2$$

Solución para H₂O₂ a 0,2M

$$0,2*1L=9,79*V_2$$

$$V_2=0,020L$$

V₂=20 mL de H₂O₂ comercial

Solución para H₂O₂ a 0,4M

$$0,4*1L=9,79*V_2$$

$$V_2=0,041L$$

V₂=41 mL de H₂O₂ comercial

Solución para H₂O₂ a 0,1M

$$0,4*1L=9,79*V_2$$

$$V_2=0,010L$$

V₂=10 mL de H₂O₂ comercial

3.1.7 Implementación de sistema Foto Fenton

Teniendo los equipos anteriores mencionados se inició con la inoculación del agua residual del frigorífico con un volumen de 200 mL en los 4 vasos de precipitación que contiene el equipo de pruebas de jarras luego se programó el equipo para 100 RPM por un periodo de una hora, durante los primeros minutos se agregó lentamente el sulfato de fierro pesado en las lunas de reloj y a continuación se incrementó 50 mL de H₂O₂ a diferentes molaes dependiendo del tratamiento por las paredes de los vasos según como se especifica en el diseño experimental, se tiene que tomar mediciones del pH para determinar el índice de acidez en el cual operara el proceso, a continuación, prender las lámparas fluorescentes UV y taparlo con papel metálico para exponerse a la radiación como se muestra de la figura 12 a la 14.

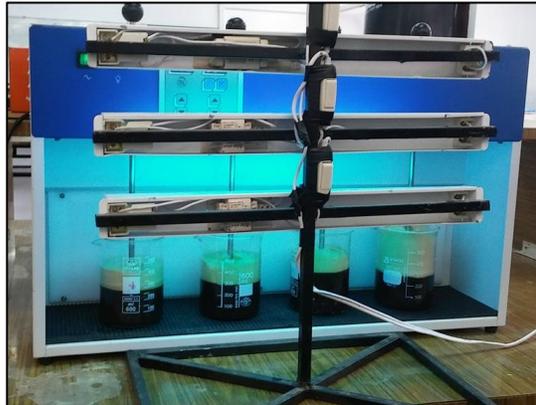
Figura 12 Medición de pH de las aguas residuales del frigorífico



Figura 13 Instalación de las lámparas UV



Figura14 Puesta en marcha del sistema Foto Fenton



El equipo de prueba de jarras ayudó al trabajo de investigación, a homogenizar los compuestos que presenta el proceso Foto Fenton como son el H_2O_2 y el FeSO_4 , facilitando la mezcla completa con 100 RPM siendo constante para todos los tratamientos y sus réplicas que se realizaron en el trabajo de investigación, caso contrario se habría utilizado un agitador magnético para cada prueba experimental, la dificultad es la radiación UV la cual por protección no se debe estar expuesto directamente por ese motivo que nos facilitó el equipo de jarras.

Figura 15 Cubriendo el sistema Foto Fenton



3.1.8 Determinación de la materia orgánica

La determinación del contenido total de materia orgánica en muestras acuosas es a partir de la cantidad de oxígeno necesaria para su completa oxidación.

Los vertidos industriales se caracterizan y regulan, entre otros parámetros, por su contenido en carbono y su demanda de oxígeno, la cantidad de materia orgánica putrescible se puede determinar por dos procedimientos:

- Demanda química de oxígeno, DQO.
- Demanda bioquímica de oxígeno, DBO.

Estos métodos se utilizaron en la investigación para determinar el porcentaje de materia orgánica.

3.1.9 Tipo de la investigación

El tipo de investigación es experimental, donde se analizó el efecto producido por la manipulación de las variables. Se desea comprobar el efecto de las variables independientes peróxido de hidrogeno (H_2O_2), sulfato ferroso ($FeSO_4$) y radiación ultravioleta (UV) sobre la dependiente (carga orgánica). (Casimiro Urcos & Guardian Chavez, 2010).

3.1.10 Nivel de la investigación

De acuerdo a la naturaleza de la investigación es un estudio correlacionado y experimental, donde se tuvo por finalidad establecer algún tipo de correlación y explicación de las variables para así encontrar una relación de causa y efecto. (Casimiro Urcos & Guardian Chavez, 2010).

3.2 Diseño de la investigación.

El diseño de investigación presenta un diseño del tipo factorial, donde se tiene 2 variables independientes y 3 niveles ($3^2=9$), obteniéndose un total de 9 experimentos. El cual se explica en la siguiente tabla.

Tabla 3 Diseño de la investigación

COMBINACION	HF1	HF2	HF3
1er RV 1	EXPERIMENTO N° 1 HF ₁ , RV ₁	EXPERIMENTO N° 2 HF ₂ , RV ₁	EXPERIMENTO N° 3 HF ₃ , RV ₁
2do RV2	EXPERIMENTO N° 4 HF ₁ , RV ₂	EXPERIMENTO N° 5 HF ₂ ,RV ₂	EXPERIMENTO N° 6 HF ₃ , RV ₂
3er RV 3	EXPERIMENTO N° 7 HF ₁ , RV ₃	EXPERIMENTO N° 8 HF ₂ , RV ₃	EXPERIMENTO N° 9 HF ₃ , RV ₃

Fuente: elaboración propia

DONDE:

- HF: peróxido de hidrogeno y sulfato de fierro
- RV: radiación ultravioleta

3.3 Hipótesis de la investigación

3.3.1 Hipótesis general

El porcentaje de remoción de DQO y DBO₅ mediante el método de fotocátalisis homogénea (Foto Fenton) es significativa en el tratamiento de las aguas residuales industriales del Frigorífico Cárnicos del Centro S.A.C. FRICACEN a nivel de laboratorio.

3.3.2 Hipótesis específicas

- La caracterización fisicoquímica de las aguas residuales industriales del frigorífico FRICACEN del distrito de Concepción exceden los límites máximos permisibles.
- La radiación ultravioleta y los parámetros de la fotocátalisis homogénea en la remoción de DQO y DBO₅ son significativos en el tratamiento de las aguas residuales industriales.
- La disminución de la DQO y DBO₅ es significativa mediante el método de fotocátalisis homogénea Foto Fenton en el

tratamiento de las aguas residuales industrial del frigorífico FRICACEN del distrito de Concepción.

3.4 Variables

3.4.1 Variable independiente

- Concentraciones de Fe^{+2} (mg) y H_2O_2 (mg/L).
- Radiación ultravioleta (240nm) (W).

3.4.2 Variable dependiente

- DQO (mg/L) y DBO_5 (mg/L).

3.5 Cobertura del estudio.

3.5.1 Universo.

Aguas residuales de los camales municipales.

3.5.2 Población.

Agua residual industrial del frigorífico FRICACEN.

3.5.3 Muestra.

Se tomará el volumen de 200 mL del agua residual del frigorífico para posteriormente tratarlo por el método de fotocatalisis homogénea.

3.5.4 Muestreo

El muestreo que se realizó fue un muestreo compuesto puntual debido a que el afluente no tiene un caudal constante.

3.6 Técnicas e instrumentos

3.6.1 Técnicas de la investigación.

- Observación de Campo (toma de muestra en el frigorífico, mediciones de pH).
- Revisión de bibliotecas virtuales.
- Base de datos
- Revistas científicas
- Artículos científicos

3.6.2 Instrumentos de la investigación.

- Reportes de análisis de laboratorio
- Cuadernos de apuntes

3.7 Procesamiento estadístico de la información.

3.7.1 Estadísticos.

Se aplicó software estadístico el Minitab para obtener la linealidad de resultado, el análisis de dispersión.

3.7.2 Representación.

Mediante gráficos que fundamente la investigación y artículos de investigaciones realizadas que tengan similitud al trabajo de investigación que se está realizando.

3.7.3 Técnica de comprobación de la hipótesis.

Comprobación de hipótesis mediante un análisis de varianza ANOVA de TUKEY para determinar el grado de desviación en los tratamientos.

CAPITULO IV

4 ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Resultados.

Se realizó la caracterización de las aguas residuales industriales del frigorífico FRICACEN del distrito de Concepción, habiendo realizado un muestreo compuesto como indica la normativa N° 003-2010-MINAM, para monitoreo de agua residual, también se monitorea el tiempo y el pH de las muestras tratadas mediante el proceso de fotocátalisis homogénea (Foto Fenton), en cada periodo de 30 minutos se tomó alícuotas que fueron llevadas al Laboratorio de Aguas de la Facultad de Ingeniería Química, para determinar el DQO y DBO₅.

4.1.1 Caracterización de las aguas residuales industriales del frigorífico

Se tomaron muestras representativas de los efluentes de la industria frigorífica mediante el protocolo de monitoreo y muestreo de la Autoridad Nacional del Agua, R.J. N° 010-2016-ANA las cuales se envió al Laboratorio para determinar los parámetros necesarios que

nos indicó como inicio de la investigación obteniendo como resultado siguiente Tabla 4.

Tabla 4 Caracterización del agua residual del frigorífico

Parámetros	Método	Concentración
Solidos disueltos	MS-2540-C-Secado a 180°C	1845,0 mg/L
Solidos suspendidos	MS-2540-C-Secado a 103°C-105°C	1391,0 mg/L
Solidos totales	MS-2540-C-Secado a 103°C-105°C	3236,0 mg/L
O ₂	MS-5220-D- reflujo	0 mg/L
pH	MS-4500-H ⁺ -B- Electrométrico	7,4
Conductividad	MS-2540-C-Secado a 180°C	3574,0 $\mu S m/cm$
DQO	MS-5220-D-reflujo cerrado colorimétrico	5803,5 mg/L
DBO ₅	MS-5210-B-ROD 5 días	3501,0 mg/L

4.1.2 Tratamientos experimentales

Los tratamientos experimentales se realizaron basados al diseño experimental que se encuentra en el capítulo anterior donde se determinaron 9 experimentos y tres replicas, las variables que se manipularon durante la investigación fueron las sustancias que conforman la fotocatalisis homogénea y la potencia de radiación UV cada uno con tres niveles como se muestra en la siguiente Tabla 5.

Tabla 5 Valores de las variables de investigación

	Fe ²⁺	H ₂ O ₂	Radiación UV
Niveles	50 mg	0,2 M	15 W
	100 mg	0,4 M	30 W
	200 mg	0,1 M	45 W

En la Tabla 5 se muestra la masa y la concentración de los reactivos de la fotocatalisis homogénea los que fueron seleccionados de la

referencia (Blanco, 2009), las cuales nos ayudaron a desarrollar el trabajo de investigación.

Con la ayuda de un equipo de jarras se desarrolló las pruebas experimentales como se muestra en la Tabla 6 a las condiciones de 15 W de potencia de radiación UV, mediante una lámpara fluorescente marca OSRAM.

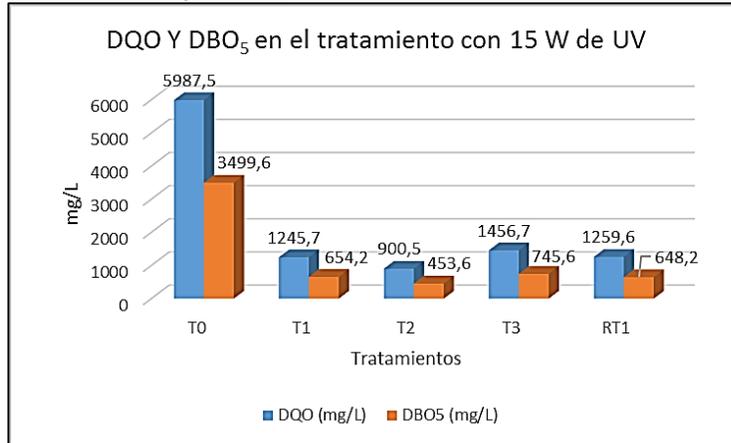
Tabla 6 Resultados de los tratamientos con 15 W de UV

Tratamiento	Tiempo (min)	FeSO ₄ (mg)	H ₂ O ₂ (M)	pH	DQO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)
T0	0			7,84	5987,5	3499,6
T1	30	50	0,2	7,91	1984,1	1113,7
	60	50	0,2	7,75	1245,7	654,2
T2	30	100	0,4	7,45	1854,6	1004,5
	60	100	0,4	6,97	900,5	453,6
T3	30	200	0,1	7,55	2002,4	1105,4
	60	200	0,1	7,31	1456,7	745,6
TR1	30	50	0,2	7,21	1902,4	1043,1
	60	50	0,2	6,99	1259,6	648,2

En la Tabla 6 se observa en la primera columna la representación de los tratamientos, T0 representa los valores iniciales de cómo se encuentra la muestra antes del tratamiento respectivo, T1 representa el desarrollo la prueba experimental a las condiciones de 50 mg de FeSO₄ y 0,2 M de H₂O₂, T2 representa el desarrollo la prueba experimental a las condiciones de 100 mg de FeSO₄ y 0,4 M de H₂O₂, T3 representa el desarrollo la prueba experimental a las condiciones de 200 mg de FeSO₄ y 0,1 M de H₂O₂, y TR1 representa la réplica del tratamiento T1 a las condiciones de 50 mg de FeSO₄ y 0,2 M de H₂O₂, los tiempos que la muestra estuvo en constante mezcla completo fue de 60 minutos de las cuales se tomaron alícuotas en los 30 minutos y al finalizar el proceso, los resultados del pH en los diferentes tratamientos disminuyeron ligeramente no

siendo tan significativos, respecto a la DQO se observa que existe diferencias significativas al transcurrir el tiempo al igual que en la DBO₅.

Figura 16 DQO y DBO₅ en el tratamiento con 15 W de UV



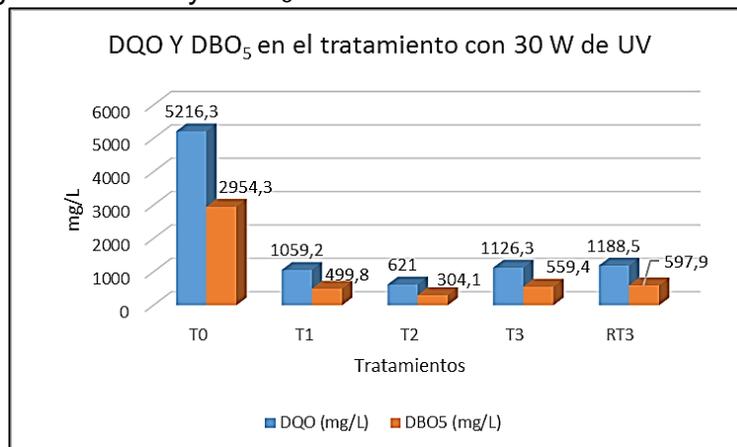
En la Figura 16; se observa para T0 que representa el valor inicial de la muestra de 5987,5 mg/L de DQO y 3499,6 mg/L de DBO₅ los cuales disminuyeron en cada tratamiento, así como para T1 se obtuvo 1245,7 mg/L de DQO y 654,2 mg/L de DBO₅, para T2 se obtuvo 900,5 mg/L de DQO y 453,6 mg/L de DBO₅, para T3 se obtuvo 1456,7 mg/L de DQO y 745,6 mg/L de DBO₅ y para RT1 se obtuvo 1259,6 mg/L de DQO y 648,2 mg/L de DBO₅, en un periodo de 60 minutos de operación del tratamiento.

Tabla 7 Resultados de los tratamientos con 30 W de UV

Tratamiento	Tiempo (min)	FeSO ₄ (mg)	H ₂ O ₂ (M)	pH	DQO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)
T0	0			7,44	5216,3	2954,3
T1	30	50	0,2	7,52	1845,3	1021,8
	60	50	0,2	7,21	1059,2	499,8
T2	30	100	0,4	7,64	1625,4	897,5
	60	100	0,4	7,51	621	304,1
T3	30	200	0,1	7,05	2154,6	1155,8
	60	200	0,1	6,98	1126,3	559,4
TR3	30	200	0,1	7,24	2103,5	1140,1
	60	200	0,1	7,15	1188,5	597,9

En la Tabla 7 se observa en la primera columna la representación de los tratamientos, T0 representa los valores iniciales de cómo se encuentra la muestra antes del tratamiento respectivo, T1 representa el desarrollo la prueba experimental a las condiciones de 50 mg de FeSO_4 y 0,2 M de H_2O_2 , T2 representa el desarrollo la prueba experimental a las condiciones de 100 mg de FeSO_4 y 0,4 M de H_2O_2 , T3 representa el desarrollo la prueba experimental a las condiciones de 200 mg de FeSO_4 y 0,1 M de H_2O_2 , y TR3 representa la réplica del tratamiento T3 a las condiciones de 200 mg de FeSO_4 y 0,1 M de H_2O_2 , los tiempos que la muestra estuvo en constante mezcla completo fue de 60 minutos de las cuales se tomaron alícuotas en los 30 minutos y al finalizar el proceso, los resultados del pH en los diferentes tratamientos disminuyeron ligeramente no siendo tan significativos, respecto a la DQO se observa que existe diferencias significativas al transcurrir el tiempo al igual que en la DBO_5 .

Figura 17 DQO y DBO_5 en el tratamiento con 30 W de UV



En la Figura 17 se observa para T0 que representa el valor inicial de la muestra de 5216,3 mg/L de DQO y 2954,3 mg/L de DBO_5 los cuales disminuyeron en cada tratamiento, así como para T1 se

obtuvo 1059,2 mg/L de DQO y 499,8 mg/L de DBO₅, para T2 se obtuvo 621 mg/L de DQO y 304,1 mg/L de DBO₅, para T3 se obtuvo 1126,3 mg/L de DQO y 559,4 mg/L de DBO₅ y para RT1 se obtuvo 1188,5 mg/L de DQO y 597,9 mg/L de DBO₅, en un periodo de 60 minutos de operación del tratamiento.

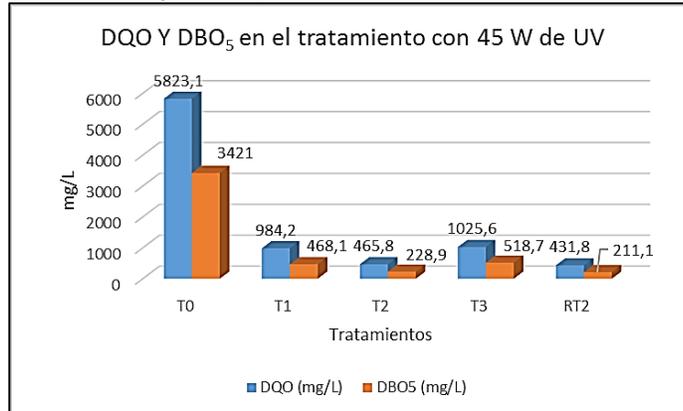
Tabla 8 Resultados de los tratamientos con 45 W de UV

Tratamiento	Tiempo (min)	FeSO ₄ (mg)	H ₂ O ₂ (M)	pH	DQO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)
T0	0			7,74	5823,1	3421
T1	30	50	0,2	7,24	2045,1	1105,2
	60	50	0,2	7,1	984,2	468,1
T2	30	100	0,4	7,27	1542,1	815,6
	60	100	0,4	6,29	465,8	228,9
T3	30	200	0,1	7,46	1999,2	1115,8
	60	200	0,1	6,24	1025,6	518,7
TR2	30	100	0,4	7,22	1599,1	844,2
	60	100	0,4	6,89	431,8	211,1

En la Tabla 8 se observa en la primera columna la representación de los tratamientos, T0 representa los valores iniciales de cómo se encuentra la muestra antes del tratamiento respectivo, T1 representa el desarrollo la prueba experimental a las condiciones de 50 mg de FeSO₄ y 0,2 M de H₂O₂, T2 representa el desarrollo la prueba experimental a las condiciones de 100 mg de FeSO₄ y 0,4 M de H₂O₂, T3 representa el desarrollo la prueba experimental a las condiciones de 200 mg de FeSO₄ y 0,1 M de H₂O₂, y TR2 representa la réplica del tratamiento T2 a las condiciones de 100 mg de FeSO₄ y 0,4 M de H₂O₂, los tiempos que la muestra estuvo en constante mezcla completo fue de 60 minutos de las cuales se tomaron alícuotas en los 30 minutos y al finalizar el proceso, los resultados del pH en los diferentes tratamientos disminuyeron ligeramente no siendo tan significativos, respecto a la DQO se observa que existe

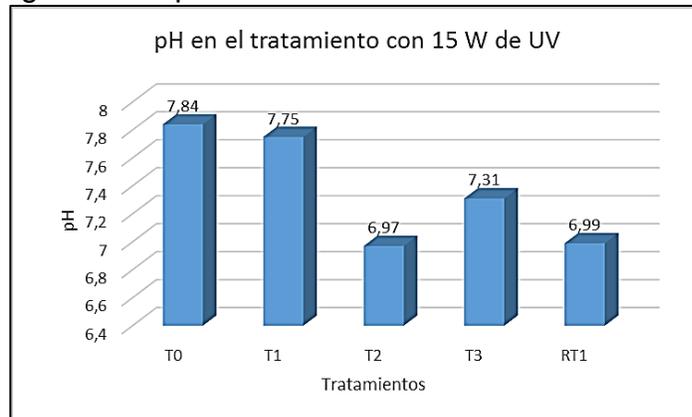
diferencias significativas al transcurrir el tiempo al igual que en la DBO_5 .

Figura 18 DQO y DBO_5 en el tratamiento con 45 W de UV



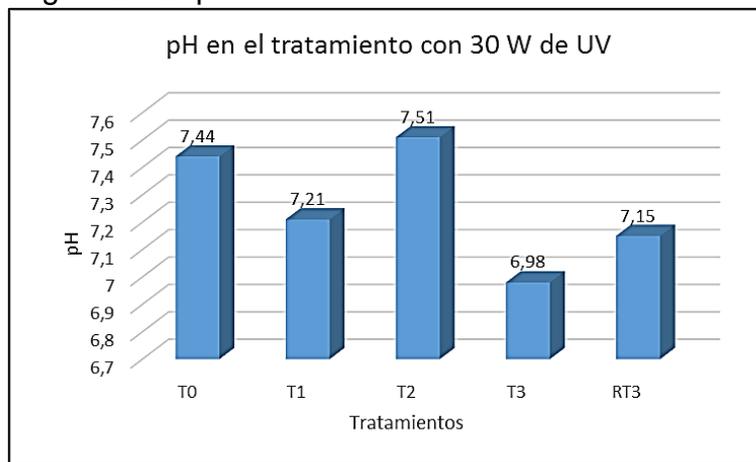
En la Figura 18 se observa para T0 que representa el valor inicial de la muestra de 5823,1 mg/L de DQO y 3421 mg/L de DBO_5 los cuales disminuyeron en cada tratamiento, así como para T1 se obtuvo 984,2 mg/L de DQO y 468,1 mg/L de DBO_5 , para T2 se obtuvo 465,8 mg/L de DQO y 228,9 mg/L de DBO_5 , para T3 se obtuvo 1025,6 mg/L de DQO y 518,7 mg/L de DBO_5 y para RT1 se obtuvo 431,8 mg/L de DQO y 211,1 mg/L de DBO_5 , en un periodo de 60 minutos de operación del tratamiento.

Figura 19 El pH en el tratamiento con 15 W de UV



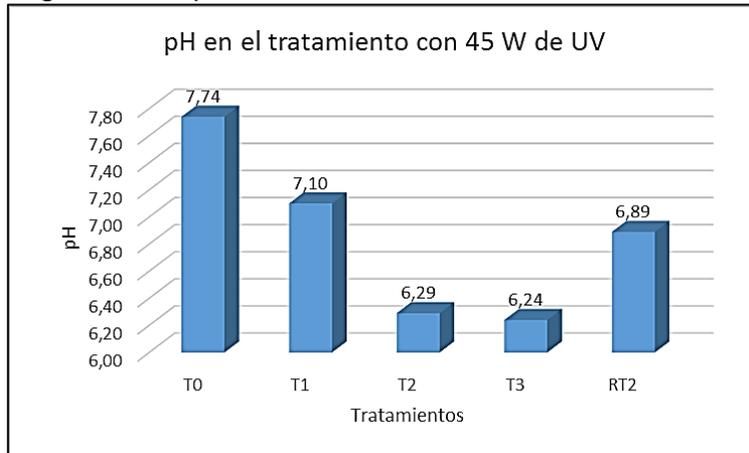
En la Figura 19 se observa la variación del pH para los tratamientos con 15 W de radiación UV, en T0 se midió un valor de 7,84 que representa el valor inicial, el cual fue disminuyendo para cada uno de los tratamientos, en T1 se midió un valor de 7,75 de pH, para T2 se midió un pH de 6,97 que es el más bajo, para T3 se midió un pH de 7,31 y para replica RT1 se midió un pH de 6,99.

Figura 20 El pH en el tratamiento con 30 W de UV



En la Figura 20 se observa la variación del pH para los tratamientos con 30 W de radiación UV, en T0 se midió un valor de 7,44 que representa el valor inicial, el cual fue disminuyendo para el primer tratamiento, en T1 se midió un valor de 7,21 de pH, para T2 aumento ligeramente sobrepasando el valor inicial el cual midió un pH de 7,51; para T3 se midió un pH de 6,98 que fue el menor valor obtenido en los tratamientos realizados y para replica RT3 se midió un pH de 7,15; el pH en cada uno de los tratamientos tiene una variación relativamente significativa, que se mantiene en el rango de neutro por los valores obtenidos en cada medición.

Figura 21 El pH en el tratamiento con 45 W de UV



En la Figura 21 se observa la variación del pH para los tratamientos con 45 W de radiación UV, en T0 se midió un valor de 7,74 de pH que representa el valor inicial, el cual fue disminuyendo para cada uno de los tratamientos, en T1 se midió un pH de 7,10; para T2 se midió un pH de 6,29 que es uno de los más bajo, para T3 se midió un pH de 6,24 al igual que el T2 son pH ligeramente ácidos y para replica RT2 se midió un pH de 6,89.

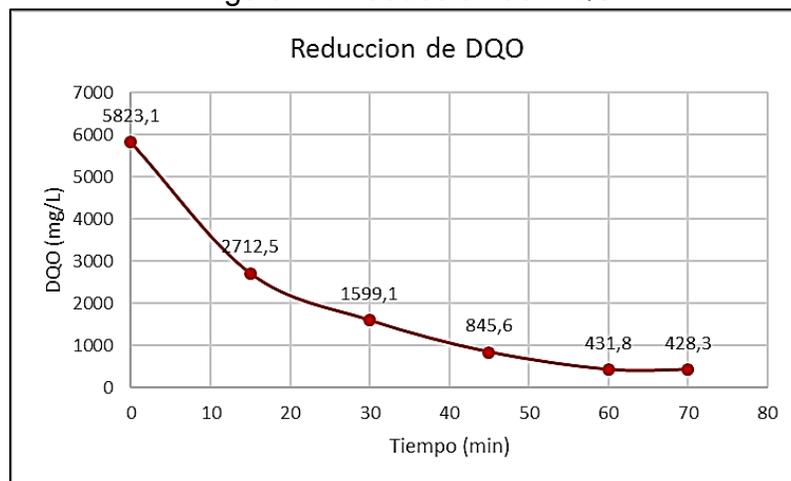
Se realizó una corrida experimental adicional con las variables que se encontraron con mayor eficiencia en el proceso y se obtuvieron los siguientes resultados como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9 Resultados de los tratamientos con 45 W de UV y 100 mg de FeSO_4 y 0.4 M de H_2O_2

Monitoreo	Tiempo (min)	pH	DQO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)
1	0	7,74	5823,1	3421
2	15	7,54	2712,5	1548,9
3	30	7,22	1599,1	844,2
4	45	7,2	845,6	456,7
5	60	6,89	431,8	211,1
6	70	6,8	428,3	209,2

En la Tabla 9 se observa en la primera columna el monitoreo que se realizó el tratamiento con 45w y 100 mg de FeSO_4 y 0.4 M de H_2O_2 , en la segunda columna se tiene los tiempos que transcurrieron en el tratamiento llegando hasta los 70 minutos de la operación realizada, en la tercera columna se observa el pH monitoreado que se inició con 7,74 a 6,8; de igual manera se analizó en el laboratorio alícuotas tomadas en cada monitoreo obteniendo 5823,1 de DQO y se redujo a 428,3 de DQO y en la quinta columna se muestra los valores de 3421 de DBO_5 que se redujo a 209, 2 de DBO_5 .

Figura 22 Reducción de DQO



En la Figura 22 se observa la reducción de DQO a las condiciones de 100 mg de FeSO_4 y 0,4 M de H_2O_2 que inicio con un valor de 5823,1 mg/L de DQO el cual se redujo a 431,8 mg/L de DQO en un periodo de 60 minutos, y 428,3 mg/L de DQO en un periodo de 70 minutos no existiendo diferencia significativa en la reducción de los últimos 10 minutos, a partir de los 60 minutos la reducción de DQO se mantiene constante habiendo reducido la materia orgánica existente dentro del efluente.

Figura 23 Reducción de DBO₅



En la Figura 23 se observa la reducción de DBO₅ a las condiciones de 100 mg de FeSO₄ y 0,4 M de H₂O₂ que inicio con un valor de 3421 mg/L de DBO₅ el cual se redujo a 211,1 mg/L de DBO₅ en un periodo de 60 minutos, y 209,2 mg/L de DBO₅ en un periodo de 70 minutos no existiendo diferencia significativa en la reducción de los últimos 10 minutos, a partir de los 60 minutos la reducción de DBO₅ de mantiene constante habiendo reducido la materia orgánica existente dentro del efluente.

4.2 Discusión de resultados

Se caracterizó las aguas residuales industriales del frigorífico FRICACEN obteniendo los resultados en la Tabla 4, los cuales superan los límites máximos permisibles según el decreto supremo DECRETO SUPREMO N° 003-2010-MINAM, los valores de la caracterización fueron de 1845,0 mg/L de Solidos disueltos, 1391,0 mg/L de Solidos suspendidos, 3236,0 mg/L de Solidos totales, 5803,5 mg/L de DQO y 3501,0 mg/L de DBO₅ se puede afirmar los resultados exceden a los valores máximos establecidos en la normativa, como 200 mg/L de DQO y 100 mg/L de DBO₅, motivo por el cual fue necesario e inmediato el tratamientos de las aguas emitidas por el frigorífico.

Con los resultados de las pruebas experimentales se calcularon los porcentajes de remoción de DQO y DBO₅ a partir de la ecuación (19).

$$\% \text{ Remoción}_{DQO} = \frac{DQO_o - DQO_f}{DQO_o} * 100 \quad (19)$$

Aplicando la ecuación a los resultados de los tratamientos se obtuvieron las siguientes Tablas de la 10 ala 12, y en cada una de ellas se determinó la relación de DBO₅/DQO que nos indicó el grado de biodegradabilidad del efluente tratado.

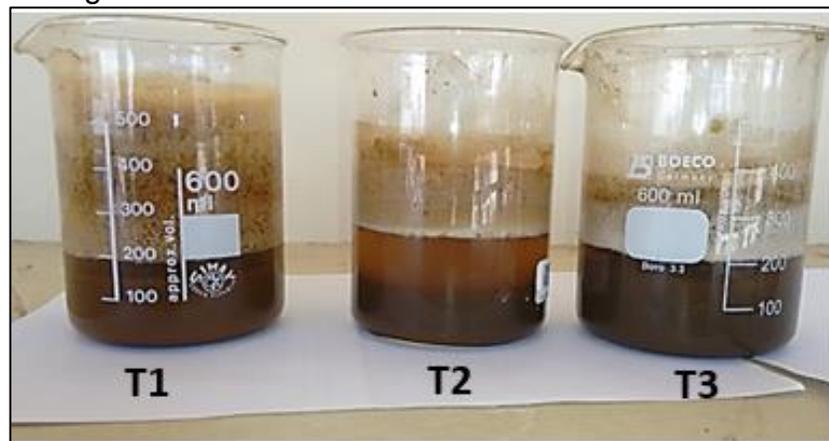
Tabla 10 Resultados % de Remoción de DQO y DBO₅ en 15 W de UV

Tratamiento	Tiempo (min)	% R DQO	% R DBO ₅	Relación DBO ₅ /DQO
T0	0	0,00%	0,00%	0,58
T1	30	66,86%	68,18%	0,56
	60	79,19%	81,31%	0,53
T2	30	69,03%	71,30%	0,54
	60	84,96%	87,04%	0,50
T3	30	66,56%	68,41%	0,55
	60	75,67%	78,69%	0,51
TR1	30	68,23%	70,19%	0,55
	60	78,96%	81,48%	0,51

En la tabla 10 se muestra los tres tratamientos y la réplica del primer tratamiento, para cada tratamiento se tomó una muestra intermedia la cual se llevó al laboratorio y con los resultados obtenidos se concreta que a los 30 minutos del tratamiento se tiene más del 50 % de la remoción ya sea en la DQO y DBO₅, para los tratamientos se empleó una lámpara de luz UV de la marca OSRAM, de bajo consumo, con una potencia eléctrica de 15 W. Se trata de una lámpara policromática con un espectro de emisión que abarca el rango de 350-400 nm. La intensidad de la luz incidente dentro del equipo de prueba de jarras, determinada por actinometría mediante la fotodescomposición del peróxido de hidrógeno, alcanza el valor de $5,67 \cdot 10^{-5}$ Einstein.s⁻¹. Este dato, junto con las características del equipo y del sistema otorgan una irradiación de 6,89 W.m⁻² lo cual nos permite hacer una estimación de como si se hubieran realizado con luz solar (Cairncross, 1990). En la reacción Fenton se lleva a cabo la oxidación del Fe(II) a Fe(III) a través de la reacción entre Fe(II) disuelto y el H₂O₂ en una solución acuosa ligeramente ácida y que conlleva a la formación del radical hidroxilo (OH*) el hierro actúa como un catalizador; sin embargo, debido a que la reducción del Fe(III) generalmente es más lenta que la oxidación del Fe(II), el hierro existe principalmente en la forma de Fe(III) en este sistema (García-Montaña & Ruiz, 2006), las concentraciones de H₂O₂ y FeSO₄ influyen en el tratamiento, como podemos observar para el tratamiento T1 se obtuvo una remoción de 79,19% de DQO y 81,31% de DQO₅ mientras que en el tratamiento T2 se incrementó la reducción a 84,96% de DQO y 87,04% de DQO₅, esto debido al incremento de FeSO₄ al igual que la concentración de H₂O₂, la velocidad de degradación aumenta con la cantidad de H₂O₂ dosificado debido a la mayor producción de radicales OH* debido a esto aumenta el porcentaje de remoción, y en el T3 se disminuye respecto al tratamiento T2 debido a la reducción de la concentración del H₂O₂ que se obtuvo una remoción de 78,96% de DQO y 81,48% de DQO₅, también el hierro actúa como catalizador en la reacción de Foto Fenton, la velocidad de

degradación de las moléculas orgánicas suele ser mayor a medida que aumenta la concentración de hierro, pero a partir de una determinada concentración de hierro disminuye la eficiencia de la reacción. Esto se debe al aumento de la turbidez de la disolución, lo que dificulta la absorción de luz necesaria para la realización del proceso Foto Fenton, o a la reacción del Fe^{2+} con radicales OH^* , como se puede observar en la Figura 24.

Figura 24 Tratamiento Foto Fenton con 15 W de UV



En la Figura 24 se observa la diferencia de las soluciones resultantes después del tratamiento en T2 es más transparente que en T1 y T3 esto debido a las concentraciones de H_2O_2 y FeSO_4 .

Tabla 11 Resultados de los tratamientos con 30 W de UV

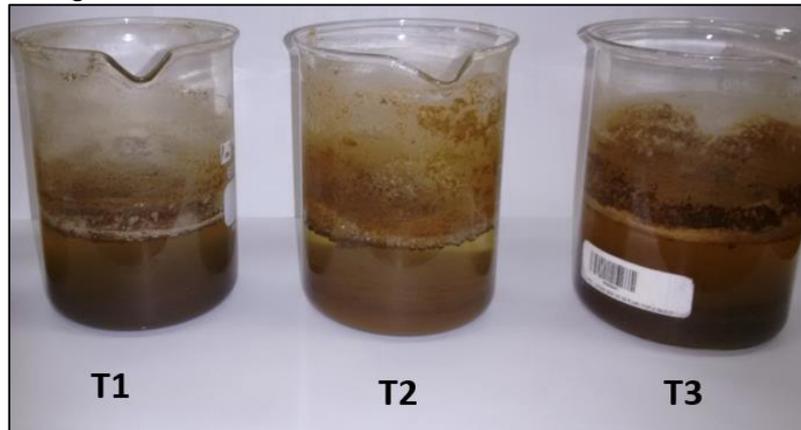
Tratamiento	Tiempo (min)	% R DQO	% R DBO ₅	Relación DBO ₅ /DQO
T0	0	0,00%	0,00%	0,57
T1	30	64,62%	65,41%	0,55
	60	79,69%	83,08%	0,47
T2	30	68,84%	69,62%	0,55
	60	88,10%	89,71%	0,49
T3	30	58,69%	60,88%	0,54
	60	78,41%	81,06%	0,50
TR3	30	59,67%	61,41%	0,54
	60	77,22%	79,76%	0,50

En la tabla 11 se muestra los tres tratamientos y la réplica del tercer tratamiento, para cada tratamiento se tomó una muestra intermedia la cual se llevó al laboratorio y con los resultados obtenidos se concreta que a los 30 minutos del tratamiento se tiene más del 50 % de la remoción ya sea en la DQO y DBO₅, para los tratamientos Se empleó dos lámparas de luz UV de la marca OSRAM, de bajo consumo, con una potencia eléctrica total de 30 W. Se trata de lámparas policromáticas con un espectro de emisión que abarca el rango de 350-400 nm. La intensidad de la luz incidente dentro del equipo de prueba de jarras, determinada por actinometría mediante la fotodescomposición del peróxido de hidrógeno, alcanza el valor de $5,67 \cdot 10^{-5}$ Einstein.s⁻¹. Este dato, junto con las características del equipo y del sistema otorgan una irradiación de 13,78 W.m⁻² lo cual nos permite hacer una estimación de como si se hubieran realizado con luz solar.

En la reacción Fenton se lleva a cabo la oxidación del Fe(II) a Fe(III) a través de la reacción entre Fe(II) disuelto y el H₂O₂ en una solución acuosa ligeramente ácida y que conlleva a la formación del radical hidroxilo (OH*) el fierro actúa como un catalizador; sin embargo, debido a que la reducción del Fe(III) generalmente es más lenta que la oxidación del Fe(II), el fierro existe principalmente en la forma de Fe(III) en este sistema, la radiación UV aumenta considerablemente la cinética la reacción así como las concentraciones de H₂O₂ y FeSO₄ influyeron en el tratamiento, como podemos observar para el tratamiento T1 se obtuvo un remoción de 79,69% de DQO y 83,08% de DQO₅ mientras que en el tratamiento T2 se incrementó la reducción a 88,10% de DQO y 89,71% de DQO₅, esto debido al incremento de FeSO₄ al igual que la concentración de H₂O₂, la velocidad de degradación aumenta con la cantidad de H₂O₂ dosificado debido a la mayor producción de radicales OH* debido a esto aumenta el porcentaje de remoción, y en el T3 disminuye respecto al tratamiento T2 debido a la reducción de la concentración del H₂O₂ que se obtuvo una remoción de 78,41% de DQO y

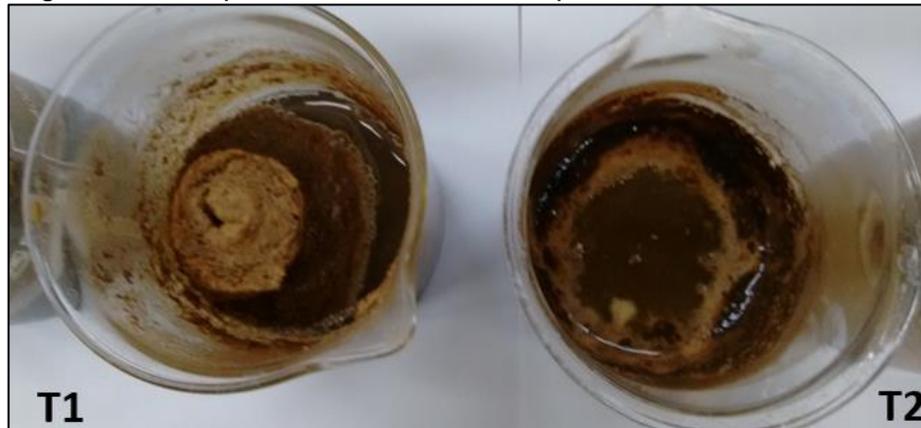
81,06% de DQO₅, el hierro actúa como catalizador en la reacción de Foto Fenton, la velocidad de degradación de las moléculas orgánicas suele ser mayor a medida que aumenta la concentración de hierro, pero a partir de una determinada concentración de hierro disminuye la eficiencia de la reacción. La relación H₂O₂-Fe²⁺ debe ser optimizada, evitando así la recombinación de los radicales OH* y la producción de una excesiva precipitación de complejos de Fe³⁺, los cuales, con el control del pH se logra retardar. La relación de DBO₅/DQO es un indicador del grado de biodegradabilidad que existe dentro del efluente a tratar según los resultados el valor inicial antes de los tratamientos es de 0,57 el cual fue reducido en los tras tratamientos menor a 0,5 lo que nos indica que se mineralizó la materia orgánica existente en el efluente, como podemos observar en la figura siguiente.

Figura 25 Tratamiento Foto Fenton con 30 W de UV



En la Figura 25 se observa la diferencia en las soluciones resultantes después del tratamiento en T2 es más transparente que en T1 que también se va aclarando un poco más que el T3 esto debido a las concentraciones de H₂O₂ y FeSO₄ y la mayor radiación UV se aplicó en los tratamientos.

Figura 26 Comparación de sólidos suspendidos con 30 W de UV



En la Figura 26 se observa la diferencia de los sólidos suspendidos que se generaron en los tratamientos T1 y T2 donde se nota la menor formación de sólidos en el tratamiento T2 y el agua más clara.

Tabla 12 Resultados de los tratamientos con 45 W de UV

Tratamiento	Tiempo (min)	% R DQO	% R DBO ₅	Relación DBO ₅ /DQO
T0	0	0,00%	0,00%	0,59
T1	30	64,88%	67,69%	0,54
	60	83,10%	86,32%	0,48
T2	30	73,52%	76,16%	0,53
	60	92,00%	93,31%	0,49
T3	30	65,67%	67,38%	0,56
	60	82,39%	84,84%	0,51
TR2	30	72,54%	75,32%	0,53
	60	92,58%	93,83%	0,49

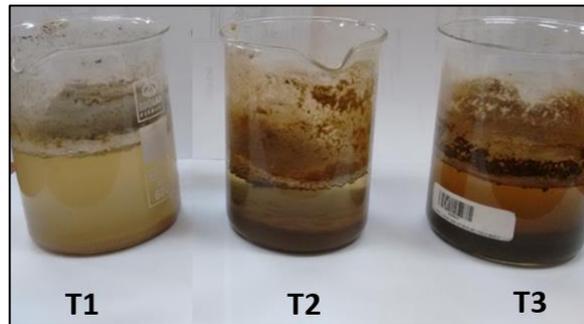
En la tabla 12 se muestra los tres tratamientos y la réplica del segundo tratamiento, para cada tratamiento se tomó una muestra intermedia la cual se llevó al laboratorio y con los resultados obtenidos se concreta que a los 30 minutos del tratamiento se tiene más del 60 % de la remoción ya sea en la DQO y DBO₅, para los tratamientos Se empleó 3 lámpara de luz UV de la marca OSRAM, de bajo consumo, con una potencia eléctrica total de 45 W.

Se trata de lámparas policromáticas con un espectro de emisión que abarca el rango de 350-400 nm. La intensidad de la luz incidente dentro del equipo de prueba de jarras, determinada por actinometría mediante la fotodescomposición del peróxido de hidrógeno, alcanza el valor de $5,67 \cdot 10^{-5}$ Einstein. s^{-1} . Este dato, junto con las características del equipo y del sistema otorgan una irradiación de $20,67 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ lo cual nos permite hacer una estimación de como si se hubieran realizado con luz solar.

En la reacción Fenton se lleva a cabo la oxidación del Fe(II) a Fe(III) a través de la reacción entre Fe(II) disuelto y el H_2O_2 en una solución acuosa ligeramente ácida y que conlleva a la formación del radical hidroxilo (OH^*) el hierro actúa como un catalizador; sin embargo, debido a que la reducción del Fe(III) generalmente es más lenta que la oxidación del Fe(II), el hierro existe principalmente en la forma de Fe(III) en este sistema, la radiación UV aumenta considerablemente la cinética la reacción así como las concentraciones de H_2O_2 y FeSO_4 influyen en el tratamiento, como podemos observar para el tratamiento T1 se obtuvo una remoción de 83,10% de DQO y 86,32% de DQO_5 mientras que en el tratamiento T2 se incrementó la reducción a 92,00% de DQO y 93,31% de DQO_5 , esto debido al incremento de FeSO_4 al igual que la concentración de H_2O_2 , la velocidad de degradación aumenta con la cantidad de H_2O_2 dosificado debido a la mayor producción de radicales OH^* debido a esto aumenta el porcentaje de remoción, y en el T3 disminuye respecto al tratamiento T2 debido a la reducción de la concentración del H_2O_2 que se obtuvo una remoción de 82,39% de DQO y 84,84% de DQO_5 , para comprobar la alta remoción de que género en el tratamiento T2 se realizó una réplica TR2 obteniendo estos resultados 92,58% de DQO y 93,83% de DQO_5 , el fierro actúa como catalizador en la reacción de Foto Fenton, la velocidad de degradación de las moléculas orgánicas suele ser mayor a medida que aumenta la concentración de fierro, pero a partir de una determinada concentración de fierro disminuye la eficiencia de la reacción. La relación $\text{H}_2\text{O}_2\text{-Fe}^{2+}$ debe ser optimizada,

evitando así la recombinación de los radicales OH^* y la producción de una excesiva precipitación de complejos de Fe^{3+} , los cuales, con el control del pH se logra retardar. La relación de DBO_5/DQO es un indicador del grado de biodegradabilidad que existe dentro del efluente a tratar según los resultados el valor inicial antes de los tratamientos es de 0,59 el cual fue reducido en los tras tratamientos menor a 0,49 lo que nos indica que se mineralizo en su totalidad la materia orgánica existente en el efluente y solo quedando sustancias orgánicas no biodegradables que son mínimas, la comparación de estos resultados se puede observar en la siguiente Figura.

Figura 27 Tratamiento Foto Fenton con 45 W de UV



En la figura 27 se observa la diferencia en las soluciones resultantes después del tratamiento, en T2 es más transparente la solución resultante que los tratamientos en T1 y T3, además se ve otra diferencia entre T3 más claro que el tratamiento T1 esto debido a las concentraciones de H_2O_2 y FeSO_4 y la mayor radiación UV se aplicó a cada uno de los tratamientos.

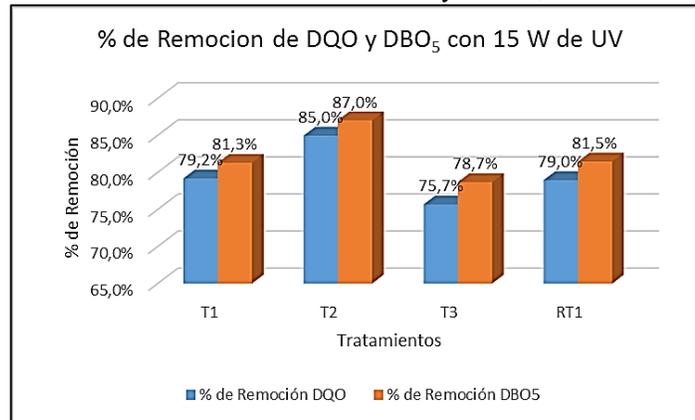
Figura 28 Comparación de solidos suspendidos con 30 W de UV



En la figura 28 se observa la formación de los sólidos suspendidos que se generaron en los tratamientos T1 y T2, la menor formación de sólidos se da

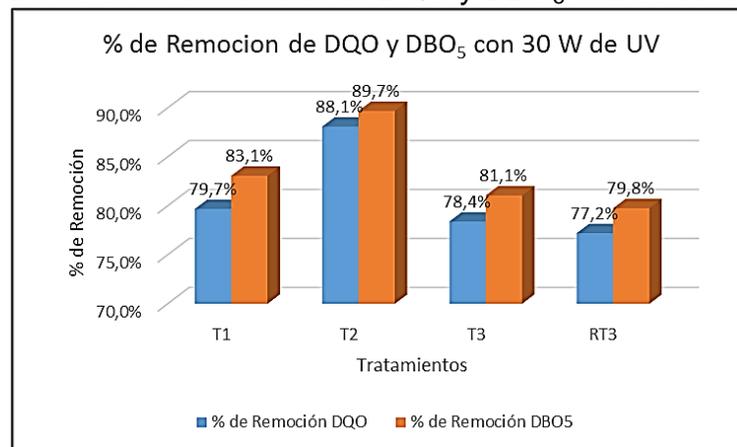
en el tratamiento T2 y el agua se encuentra más clara en comparación a tratamiento T1.

Figura 29 % de Remoción de DQO y DBO₅ con 15 W de UV



En la figura 29 se visualiza que el mayor porcentaje de remoción es de 85% en DQO y un 87% DBO₅ esto se dio en el tratamiento T2, mientras que el menor porcentaje de remoción es de 75,7% de DQO y 78,7% de DBO₅ para el tratamiento T3, habiéndose realizado una réplica en el tratamiento T1 el cual no existe diferencia significativa ya que varían en decimas los resultados, los tratamientos fueron realizados con 15 W de radiación UV.

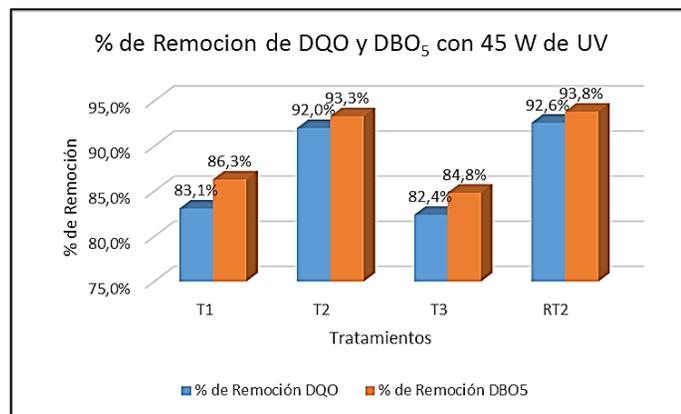
Figura 30 % de Remoción de DQO y DBO₅ con 30 W de UV



En la figura 30 se visualiza que el mayor porcentaje de remoción es de 88,1% en DQO y un 89,7% DBO₅ esto se dio en el tratamiento T2 debido a la

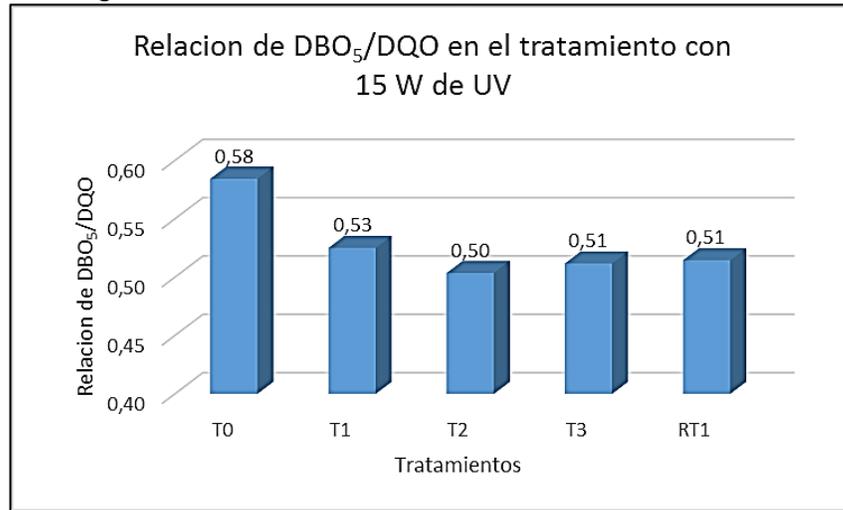
concentración de 0,4 M de H_2O_2 y la masa de 100 mg de FeSO_4 principales agentes y catalizador para la degradación de la materia orgánica, mientras que el menor porcentaje de remoción es de 78,4% de DQO y 81,1% de DBO_5 para el tratamiento T3 el cual se trabajó con la concentración de 0,1 M de H_2O_2 y la masa de 400 mg de FeSO_4 , habiéndose realizado una réplica en el tratamiento T3 el cual no existe diferencia significativa ya que varían en decimas los resultados, los tratamientos fueron realizados con 30 W de radiación UV.

Figura 31 % de remoción de DQO y DBO_5 con 45 W de UV



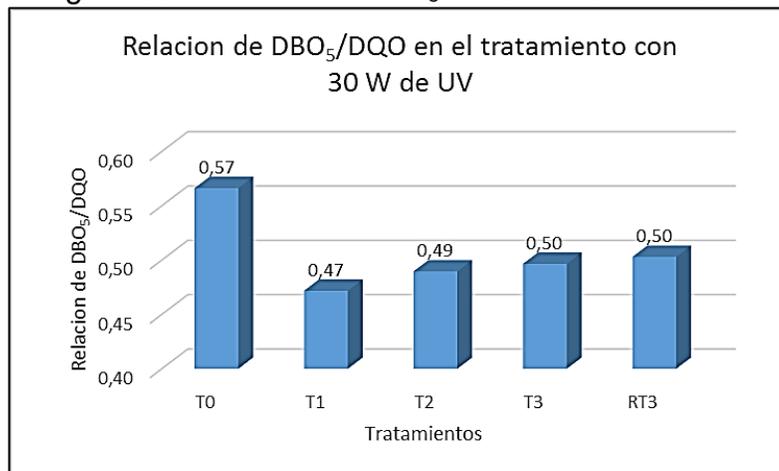
En la figura 31 se visualiza que el mayor porcentaje de remoción es de 92,0% en DQO y un 93,3% DBO_5 esto se dio en el tratamiento T2 debido a la concentración de 0,4 M de H_2O_2 y la masa de 100 mg de FeSO_4 principales agentes y catalizador para la degradación de la materia orgánica, mientras que el menor % de remoción es de 82,4% de DQO y 84,8% de DBO_5 para el tratamiento T3 el cual se trabajó con la concentración de 0,1 M de H_2O_2 y la masa de 400 mg de FeSO_4 , habiéndose realizado una réplica en el tratamiento T2 obteniendo los resultados de 92,6% de DQO y 93,8% de DBO_5 el cual no existe diferencia significativa ya que varían en decimas los resultados, los tratamientos fueron realizados con 45 W de radiación UV.

Figura 32 Relación de DBO₅/DQO con 15 W de UV



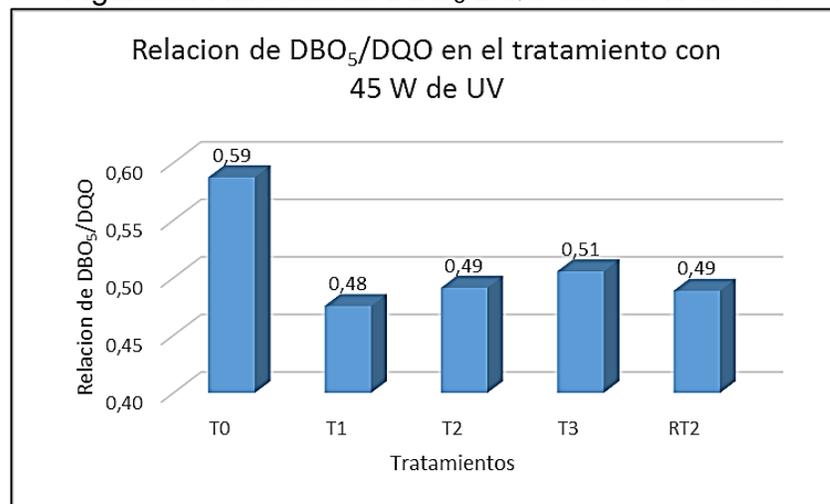
En la figura 32 la disminución de la relación de DBO₅/DQO que es un factor importante para ver la biodegradabilidad que tiene la solución tratada, con los resultados del análisis antes del tratamiento de 0,58 nos indica que existe materia biodegradable, después de los tratamientos los resultados disminuyeron indicando que todavía existe materia biodegradable dentro del efluente.

Figura 33 Relación de DBO₅/DQO con 30 W de UV



En la figura 33; la disminución de la relación de DBO_5/DQO que es un factor importante para ver la biodegradabilidad que tiene la solución tratada, con los resultados del análisis antes del tratamiento de 0,57 nos indica que existe materia biodegradable, después de los tratamientos los resultados disminuyeron en el tratamiento T1 se obtuvo 0,47 y en T2 el valor de 0,49 esto indica que ya no existe materia biodegradable la solución tratada mientras que en T3 todavía existe materia biodegradable de manera mínima.

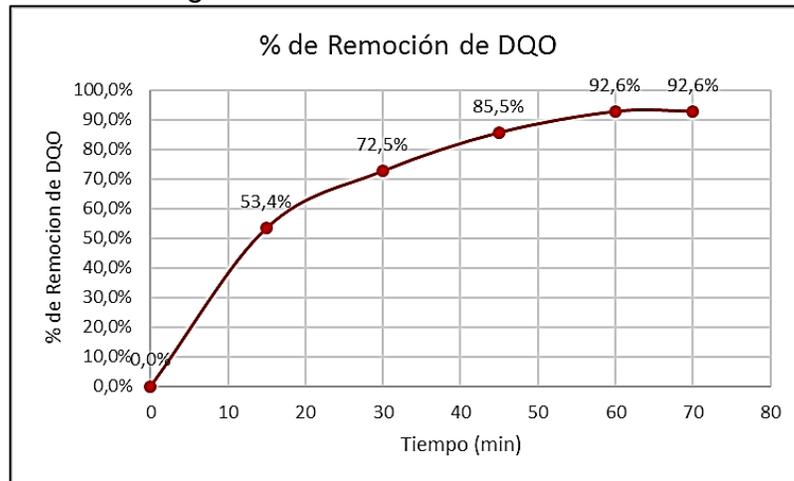
Figura 34 Relación de DBO_5/DQO con 45 W de UV



En la figura 34 la disminución de la relación de DBO_5/DQO que es un factor importante para ver la biodegradabilidad que tiene la solución tratada, con los resultados del análisis antes del tratamiento de 0,59 nos indica que existe materia biodegradable, después de los tratamientos los resultados disminuyeron en el tratamiento T1 se obtuvo 0,48 y en T2 el valor de 0,49 esto indica que ya no existe materia biodegradable la solución tratada mientras que en T3 todavía existe materia biodegradable de manera mínima. Al realizar los tratamientos según el diseño experimental planteado en el capítulo anterior se observó que la mejor remoción se obtuvo una con concentración de 0,4 M de H_2O_2 , la masa de 100 mg de $FeSO_4$ y una

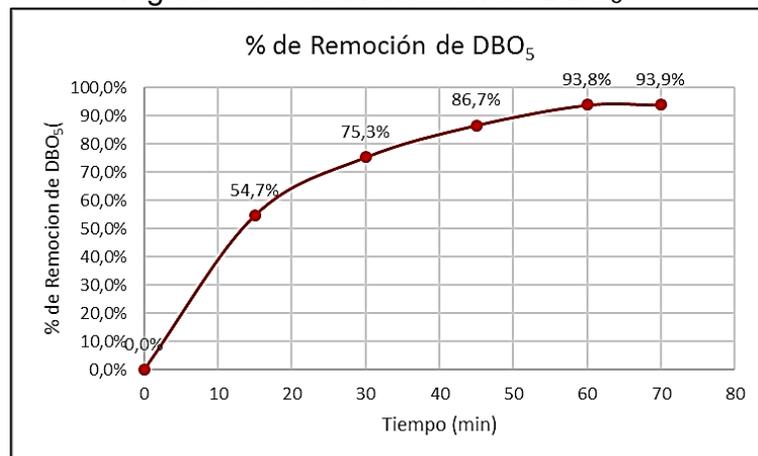
radiación UV de 45 W, y a estas condiciones se realizó una réplica aumentando los puntos de monitoreo y analizando la DQO y DBO₅ en diferentes tiempos obteniendo la siguientes Figuras respecto a la remoción que se generó.

Figura 35 % de Remoción de DQO



En la figura 35 el porcentaje de remoción de DQO se va incrementado en relación al tiempo en los primeros 15 minutos la remoción supera el 50% y después de incrementa de 20% más y así sucesivamente hasta llegar a los 60 minutos donde el porcentaje de remoción ya no se incrementa y se mantiene constante.

Figura 36 % de Remoción de DBO₅



En la figura 36 el porcentaje de remoción de DBO₅ se va incrementado en relación al tiempo en los primeros 15 minutos la remoción supera el 50% y después de incrementa de 20% más y así sucesivamente hasta llegar a los 60 minutos donde el porcentaje de remoción ya no se incrementa y se mantiene constante, debido a esto que el máximo tiempo utilizado dentro de los tratamientos fue de 60 minutos.

4.3 Contrastación de Hipótesis

One-way ANOVA: DQO versus Tratamientos

Method

Null hypothesis All means are equal
 Alternative hypothesis At least one mean is different
 Significance level $\alpha = 0,05$
 Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Tratamientos	3	T1; T2; T3

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Tratamientos	2	278,01	139,007	16,94	0,001
Error	9	73,86	8,207		
Total	11	351,88			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
2,86482	79,01%	74,34%	62,68%

Comentario:

Según el resultado del análisis estadístico mediante el software Minitab 17 aplicando un ANOVA mediante la prueba de TUKEY, se ingresaron los valores del porcentaje de remoción de DQO como respuesta al tratamiento de las aguas residuales del frigorífico mediante el tratamiento de fotocátalisis homogénea (Foto Fenton), de los diferentes tratamientos realizados el cual visualiza un P-value = 0,001 siendo menor al valor de significancia del 0,05; según este resultado se rechaza la hipótesis que los tratamientos no tienen

variación significativamente en el porcentaje de remoción de DQO, y el error del análisis estadístico tiene un valor de 8,207.

Means

Tratamientos	N	Mean	StDev	95% CI
T1	4	80,250	1,923	(77,010; 83,490)
T2	4	89,43	3,56	(86,18; 92,67)
T3	4	78,43	2,87	(75,18; 81,67)

Pooled StDev = 2,86482

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

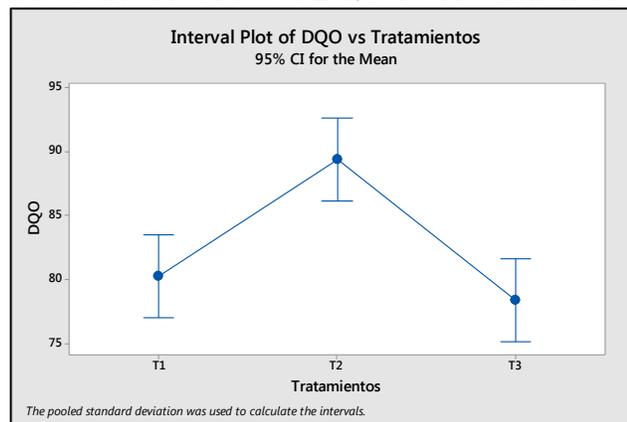
Tratamientos	N	Mean	Grouping
T2	4	89,43	A
T1	4	80,250	B
T3	4	78,43	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Comentario:

Se realizó la prueba de TUKEY con el software Minitab 17, a partir de los resultados obtenidos del porcentaje de remoción de DQO y se observó según las medias calculadas que existen dos grupos A y B esto nos indica que el grupo A es más eficiente que el grupo B y según los tratamientos el mejor resultado se dio en el tratamiento T2.

Figura 37 Interval Plot of DQO vs Tratamientos



En la figura 37 Se observa que la diferencia de las medias es significativa en función de los tratamientos por lo tanto los intervalos de confianza se encuentran distantes, el porcentaje de remoción de la DQO esta relacionada con la concentración de H_2O_2 y $FeSO_4$ y se puede afirmar que existe diferencias significativas entre medios ácidos que se utilizó para el tratamiento de lixiviados.

One-way ANOVA: DBO5 versus Tratamientos

Method

Null hypothesis All means are equal

Alternative hypothesis At least one mean is different

Significance level $\alpha = 0,05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Tratamientos	3	T1; T2; T3

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Tratamientos	2	242,75	121,373	20,79	0,000
Error	9	52,53	5,837		
Total	11	295,28			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
2,41592	82,21%	78,26%	68,37%

Comentario:

Según el resultado del análisis estadístico mediante el software Minitab 17 aplicando una ANOVA mediante la prueba de TUKEY, ingresaron los valores del porcentaje de remoción de DBO_5 como respuesta al tratamiento de las aguas residuales del frigorífico mediante el tratamiento de fotocátalisis homogénea (Foto Fenton), de los diferentes tratamientos realizados el cual visualiza un P-value = 0,000 siendo menor al valor de significancia del 0,05; según este resultado se rechaza la hipótesis que los tratamientos no tienen

variación significativamente en el porcentaje remoción de DBO₅, y el error del análisis estadístico tiene un valor de 5,837.

Means

Tratamientos	N	Mean	StDev	95% CI
T1	4	83,05	2,31	(80,32; 85,78)
T2	4	90,95	3,20	(88,22; 93,68)
T3	4	80,350	1,377	(77,617; 83,083)

Pooled StDev = 2,41592

Tukey Pairwise Comparisons

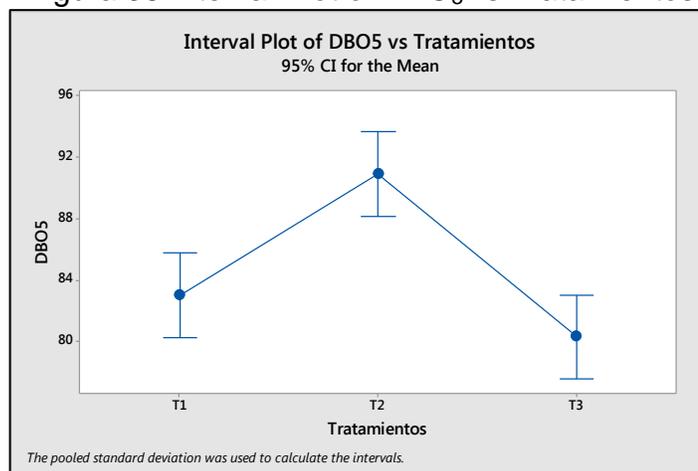
Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Tratamientos	N	Mean	Grouping
T2	4	90,95	A
T1	4	83,05	B
T3	4	80,350	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Se realizó la prueba de TUKEY con el software Minitab 17, a partir de los resultados obtenidos del % de remoción de DBO₅ y se observó según las medias calculadas que existen dos grupos A y B esto nos indica que el grupo A es más eficiente que el grupo B y según los tratamientos el mejor resultado se dio en el tratamiento T2

Figura 38 Interval Plot of DBO₅ vs Tratamientos



En la figura 38 Se observa que la diferencia de las medias es significativa en función de los tratamientos por lo tanto los intervalos de confianza se encuentran distantes, el porcentaje de remoción de la DQO esta relacionada con la concentración de H_2O_2 y FeSO_4 y se puede afirmar que existe diferencias significativas entre medios ácidos que se utilizó para el tratamiento de lixiviados.

CONCLUSIONES

El máximo porcentaje de remoción de todos los tratamientos realizados en las pruebas experimentales fue del 92,6 % de DQO y 93,9 % de DBO₅ obtenido un alto porcentaje de remoción con el proceso Foto Fenton.

Se caracterizó fisicoquímicamente las aguas residuales industriales del frigorífico FRICACEN del distrito de Concepción obteniendo 1845,0 mg/L de sólidos disueltos; 1391,0 mg/L de sólidos suspendidos; 3236,0 mg/L de sólidos totales; 0,0 mg/L de O₂; 7,4 de pH; 3574 μ Sm/cm; 5803,5 mg/L de DQO y 3501,0 mg/L de DBO₅.

Se evaluó la radiación UV para 15W, 30W y 45W en los tratamientos T1, T2 y T3 siendo el de mayor reducción de DQO y DBO₅ para una potencia de 45 W de UV y con respecto a las concentraciones de H₂O₂ el de mayor reducción fue de 0,4 M y para el FeSO₄ de 100 gramos en un periodo de mezcla completa de 60 minutos.

Se determinó la disminución de la DQO y DBO₅ mediante el método de fotocatalisis homogénea (Foto Fenton), el efluente registro un valor inicial de 5823,1 mg/L de DQO y se redujo a 465,8 mg/L de DQO obtenido un 92% de remoción de DQO, de igual manera se registró un valor inicial de 3421 mg/L de DBO₅ el cual se redujo a 228,9 mg/L de DBO₅ obteniendo un 93,3% de remoción de DBO₅ siendo estos valores los mayores obtenidos en los diferentes tratamientos.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda trabajar con pH ligeramente básicos para que no precipite el Fe (III) en el tratamiento.
- Se recomienda trabajar con protección para la exposición de la radiación UV.
- Se recomienda que la radiación UV se encuentren alrededor de todo el reactor o recipiente que contenga al agua residual a tratar.
- Se recomienda agregar el FeSO_4 de forma lenta en los tratamientos para que no se formen floculos y exista una buena mezcla completa.
- El tipo de agua tratada mediante el tratamiento de Foto Fenton aun todavía persiste DQO y DBO_5 el cual se recomienda utilizar otro método secuencial como (Humedales) para continuar reduciendo las concentraciones de DQO y DBO_5 que sobrepasan los límites máximos permisibles de la normativa N° 003-2010-MINAM.

BIBLIOGRAFÍA.

- Fernando Garcés, , L., & Mejia Franco, E. (2002). *La Fotocatalisis Como Alternativa Para El Tratamiento De Aguas Residuales*. España: Revista lasallista de investigación.
- Jaramillo Páez, C., & Taborda Ocampo, G. (2006). La fotocatalisis: Aspectos fundamentales para una buena remoción de contaminantes. *Revista Universidad de Caldas*, 9, 77-79.
- Acosta, L. (2009). proceso Foto-Fenton de oxidacion quimica para el tratamiento industrial. *Universidad Carlos III de Madrid*.
- Aguirre, M. (2010). Degradacion catalitica de contaminacion organicos mediante procesos foto-Fenton. *Universidad de Castilla*.
- Ahmed, R. W. (2006). *Tratamientos por Fenton y Fotofenton* . ESPAÑA: Cancer Research.
- Arroyanve, J., & Garces Giraldo, L. (2008). *Empleo del reactivo de feton para la degradacion de colorante tartrazina*. España: Corporación Universitaria Lasallista.
- Aznate, L., Cerro, O., & Orozco, A. (2013). Degradacion por fotocatalisis homogenea de efluentes liquidos contaminates. *Universidad de Carta Ajena*.
- Bhojwani, S. (1990). *plant tissue culture*. new york: elsevier.
- Blanco, J. (2009). Degradacion de un eluente textil real mediante procesos Fenton y foto Fenton. *Tesis de Master*.
- Cairncross, M. y. (1990). *Aguas esiduales y tratamiento de efluentes Cloacales*. LIMA: G.E.I.A. – U.T.N.
- Casimiro Urcos, W. H., & Guardian Chavez, R. A. (2010). *El arte de investigar*. Lima: Gramall.
- Clair N. SawyerR, P. M. (2000). *“Química Para Ingeniería Ambiental (4TA ed.)*. LIMA: Mc Graw Hill.

- Da Cámara L., H. M. (2000). *“Manual de diseño para plantas de tratamiento de aguas residuales alimenticias”*. Obtenido de Miniproyecto de Ingeniería Química:
[HTTP://WWW.FRBB.UTN.EDU.AR/CARRERAS/EFLUENTES/MANUAL_TRATAMIENTO.PDF](http://www.frbb.utn.edu.ar/carreras/efluentes/manual_tratamiento.pdf).
- Domènech, W., Jardim, N., & Litter, M. I. (2012). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. 5.
- Field, J. (1990). *Agua residuales de matadero*. Holanda: Wageningen.
- García-Montaño, J., & Ruiz, N. (2006). Environmental assessment of different photo-Fenton approaches for commercial reactive dye removal. *Journal of Hazardous Materials*, 138, 218–225.
- Gómez, L., Urkiada, A., & Gutiérrez, M. (2000). Tratamientos de aguas residuales. *Foto oxidación de vertidos químicos*, 214.
- Gonzales, A., Presa, M., Latorre, M., & Lura, M. (2007). Detección de oxidación avanzada PAOS. 1.
- Heinke, G., & Henry, G. (1999). Ingeniería ambiental. *Segunda Edición*, 425.
- Hincapie, G., Ocampo, D., Restrepo, G., & Marin, J. (2011). Fotocatalisis Heterogénea. *Tratamientos de Aguas*.
- Human, C. (1992). *Tratamiento de aguas residuales en los centros de beneficio a mataderos de ganado*. Colombia.
- Jaramillo, C. (2006). La Fotocatalisis. *Universidad de Caldas*.
- Katitha, V., & Palanivelu, K. (2005). destrucción of cresol by Fenton oxidation process. (3-5).
- Koshkin N, S. M. (2007). *“Biorreactor”*. *Ciencia y Tecnología Perú*.
- López, J. (2006). Foto Fenton en colorantes. *Escuela de Ingeniería Química de la Universidad del Valle*.
- Madrid, J., & Galvis, N. (2007). Recopilación de experiencias con Foto-Fenton en el tratamiento de aguas. *Universidad de Medellín*, (19-23).
- Malato, S., & Blanco, J. (2002). *Photocatalytic treatment of watersoluble pesticides by photo – Fenton and TiO₂ using solar*. *Cat. Today*.

- Marcos Hernandez, A., & Cuadros Blazquez, F. (2001). *Caracterización Y Depuración Biológica Anaerobia de Efluentes de Aguas Residuales de Matadero*. España.
- Marronquin V., G. A. (2014). síntesis y refinamiento de la estructura de dióxido de titanio. *Química Industrial*.
- Méndez L, M. V. (2004). "Tratamiento De Aguas Residuales Mediante Oxidación Avanzada A Escala De Laboratorio". *Figmmg Universidad Mayo de San Marcos*, 2.
- Mills, A., & Hunte, S. (1997). Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. *ScienceDirect*, 108.
- Moreno, B. (2006). *Higiene e Inspección de Carnes*. ESPAÑA: Dias de Santo.
- Muszkat, L., Raucher, D., & Magaritz, M. (1994). *Ground Water Contamination and Control*. New York: U. Zoller.
- O. Legrini, E. O. (1993). Photochemical processes for water treatment. *Chemical Reviews*, 93.
- Ortiz A, J. (1992). *Tratabilidad de aguas residuales de matadero con filtros*. Ingeniería e Investigación.
- Pino, O., & Lazo, F. (2010). Fotocatalisis Homogenea Degradación de aguas residuales. *Tecnología Limpia*, 39.
- Ramalho R, S. (2003). tratamiento de aguas residuales. *Segunda edición*, (29-34).
- Ramalho, R. S. (2003). *Tratamiento de Aguas Residuales*. España: Reverté S.A.
- Ramirez, Y. (2013). Diseño construcción y puesta en marcha de un reactor tubular fotocatalítico. *Universidad Tecnológica de Organico*.
- Salas C, G., & Condorhuamán C., C. (2008). *Tratamiento de las aguas residuales de un centro de beneficio o matadero de ganado*. Lima: Revista Ingeniería Química.
- Santamaría, A. M.-J. (2000). *Diccionario Terminológico de Contaminación Ambiental*. Pamplona: Ediciones Universidad de Navarra SA.
- Sierra Ramírez, D., & Vivas Albar, C. (2005). *Diseño e Implementación de una Unidad Piloto de Tratamiento Biológico no Convencional para los*

Vertimientos Generados en el Matadero de Macanal (Corpochivor). Bogota:
Universidad de la Sal.

Sirtori, C. (2010). Evaluacion analitica de procesos de transformacion biologica.
Universidad de Almeria.

Zapata, A. (2011). descontaminacion de aguas biorrecalcitrantes mediante foto-
Fenton solar y oxidacion. *Tesis Doctoral*.

ANEXOS.

Figura 1. Agua residual del frigorífico Fricasen de la provincia de concepción color rojo oscuro con olor pestilente



Figura 2. Pesado del FeSO_4 en una balanza de cuatro dígitos para obtener mayor precisión

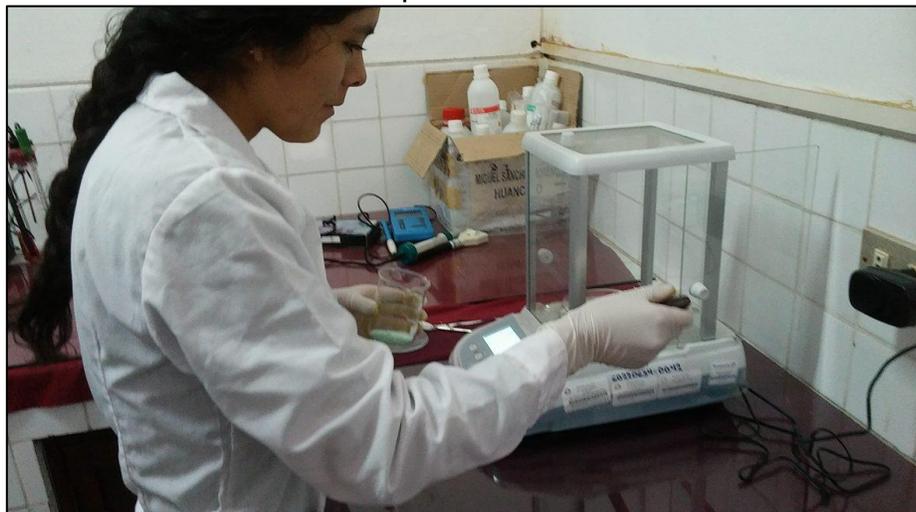


Figura 3. Pesado del compuesto de FeSO_4 para cada uno de los tratamientos de las pruebas experimentales



Figura 4. Compuesto de FeSO_4 de 200 g, 100 g y 50 g

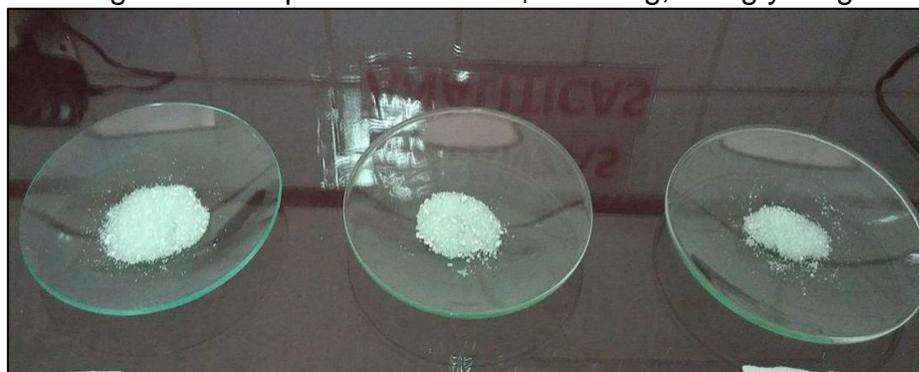


Figura 5. Preparación de H_2O_2 a las concentraciones de 0,1 M; 0,2 M y 0,4 M



Figura 6. Equipo de jarra de cuatro vasos marca Lovibond



Figura 7. Adicionando H_2O_2 en cada uno de los vasos de precipitación para llevarlos al equipo de jarras



Figura 8. Medición del pH en el efluente tratado



Figura 9. Instalación del equipo de 3 lámparas de fluorescentes de radiación UV



Figura 10. Encendido de las lámparas fluorescentes de radiación UV y de igual manera el equipo de jarras a 100 RPM



Figura 11. Recubrimiento con láminas de aluminio las lámparas fluorescentes para no exponerse a la radiación UV



Figura 12. Efluentes después de los tratamientos mediante el proceso fotocatalisis homogénea (Foto Fenton)

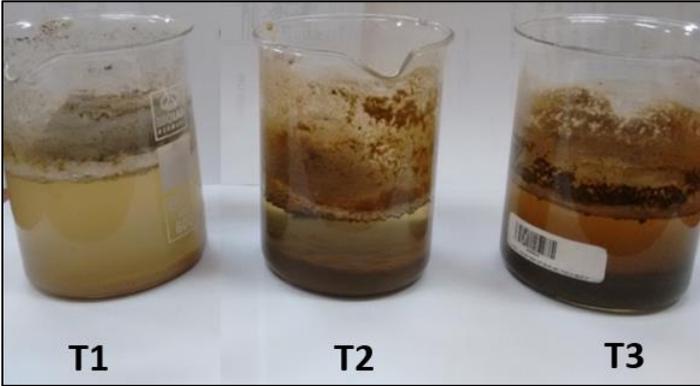


Figura 13. Solidos suspendido de los tratamientos realizados con el método de fotocatalisis homogénea (Foto Fenton)

