



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Tratamiento de efluentes de la industria de curtiembre, etapa pelambre
mediante electro - fenton**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
Ingeniero Ambiental

AUTORES:

Curo Barreto, Leonardo (ORCID: 0000-0002-3872-7809)

Mendoza Garcia, Richard Cristian (ORCID: 0000-0001-6180-6276)

ASESOR:

Dr. Valdiviezo Gonzales, Lorgio Gilberto (ORCID: 0000-0002-8200-4640)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

LIMA – PERÚ

2020

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación, a Dios por haberme dado la vida. Especialmente a mis padres, Fortunato Curo H. y Gloria Barreto Ñ. Por su apoyo incondicional y comprensión lo cual es el motivo de mi vida. A mis hermanas por su cariño y comprensión.

Curo Barreto, Leonardo

Dedicado a la memoria de mi padre, Raúl Edgar Mendoza Zarate, quien deseaba ver este momento tan glorioso, a mis hermanos y tíos quienes, a lo largo de mi carrera profesional, estuvieron apoyándome y motivándome.

Mendoza Garcia, Richard Cristian

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer al Dr. Lorgio Gilberto, Valdiviezo Gonzales por su apoyo y consejos durante la elaboración de esta tesis, igual manera por su valiosa asesoría en la presente investigación. Un eterno agradecimiento a mis padres por su apoyo incondicional, de igual manera quiero agradecer a mi amada Mary Luz, por brindarme su apoyo infinito. Finalmente quiero agradecer a mis tíos Mauro y Victoria, pues es a ellos a quienes se las debo por apoyarme durante mi carrera universitaria.

Curo Barreto, Leonardo

A mi familia en general, sobre todo a mi hermano Raúl Alejandro, Mendoza Garcia, por ser mi modelo de superación y ser mi guía en este camino tan difícil. Así mismo agradezco al Dr. Lorgio Gilberto, Valdiviezo Gonzales, por ser un excelente asesor durante el desarrollo de esta tesis.

Mendoza Garcia, Richard Cristian

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
Carátula.....	i
Agradecimiento.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Índice de contenidos.....	iv
Resumen.....	ix
Abstract.....	x
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	3
III. METODOLOGÍA.....	14
3.1. Tipo y diseño de investigación	14
3.2. Variables y operacionalización	14
3.3. Población, muestra y muestreo	14
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	15
3.5. Procedimientos.....	15
3.6. Métodos de análisis de datos	18
3.7. Aspectos éticos	19
IV. RESULTADOS.....	19
4.1. Diseño de Compuesto Central (DCC).....	19
4.2. Diseño Experimental Taguchi.....	23
V. DISCUSIÓN	27
5.1. Diseño de Compuesto Central (DCC).....	27
5.2. Diseño Experimental Taguchi.....	29
VI. CONCLUSIONES	31
VII. RECOMENDACIONES	32
REFERENCIAS.....	33
ANEXOS.....	40

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla N° 1. Aplicación del proceso Electro-Frentón en diferentes tipos de efluentes Industriales	13
Tabla N° 2. Variables codificadas del diseño de experimentos DCC para optimización del Electro-Fenton	16
Tabla N° 3. Diseño de experimentos DCC y respuestas para la remoción de DQO, SST y Turbiedad, mediante la optimización del Electro-Fenton.....	17
Tabla N° 4. Rango experimental de factores y niveles de matriz ortogonal (Taguchi)	17
Tabla N° 5. Diseños ortogonales y niveles de tres factores (Taguchi) para la optimización del Electro-Fenton.	18
Tabla N° 6. Valores observados y predichos de la remoción de DQO, SST y Turbidez, mediante la optimización del Electro-Fenton con el DCC.....	20
Tabla N° 7. Resultados del ANOVA para el DCC.....	21
Tabla N° 8. Condiciones óptimas de las variables del proceso Electro-Fenton.....	23
Tabla N° 9. Valores observados y predichos de la remoción de DQO, SST y Turbidez, mediante la optimización del Electro-Fenton con el diseño Taguchi.....	25
Tabla N° 10. Análisis de Varianza (ANOVA) ajustados para la remoción de DQO, SST y Turbidez.....	26
Tabla N° 11. Tabla de respuesta para la relación señal-ruido (S/N).....	26
Tabla N° 12. condiciones óptimas de funcionamiento de las variables del proceso de Taguchi.....	27
Tabla N° 13. Límite máximo permisible para la industria de curtiembre, Decreto Supremo N° 003 – 2002 – PRODUCE	40
Tabla N° 14. Operacionalización de variable.....	41
Tabla N° 15. Instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad	42

Tabla N° 16. Voltaje y amperio usado en mA/cm ² , en el proceso experimental Electro-Fenton. Considerando un área de 36.9 cm ²	42
Tabla N° 17. Resultados del ANOVA para el modelo cuadrático de la superficie de respuesta para la eliminación de la DQO por el proceso de electro-Fenton	43
Tabla N° 18. Resultados del ANOVA para el modelo cuadrático de la superficie de respuesta para la eliminación de la SST por el proceso de electro-Fenton.....	43
Tabla N° 19. Resultados del ANOVA para el modelo cuadrático de la superficie de respuesta para la eliminación de la Turbidez por el proceso de electro-Fenton....	44
Tabla N° 20. Tabla N° 20. Diseño Taguchi, niveles de tres factores y resultados experimentales obtenidos, mediante la optimización del Electro-Fenton.....	45
Tabla N° 21. Resultados del ANOVA para el Taguchi.....	46

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura N° 1. Principales etapas del proceso de curtiembre.....	4
Figura N° 2. Principales tipos de Fenton aplicados en el tratamiento de efluentes industriales	6
Figura N° 3. Se presenta las principales reacciones que se dan en el proceso Electro-Fenton.....	6
Figura N° 4. Parámetros de mayor influencia en el Electro-Fenton.....	7
Figura N° 5. Tipos de ánodos usados en el proceso Electro-Fenton.....	11
Figura N° 6. Tipos de cátodos usados en el proceso Electro-Fenton.....	11
Figura N° 7. Se presenta los principales componentes de un sistema Electro-Fenton a nivel de laboratorio	15
Figura N° 8. Superficie de respuesta tridimensional para la remoción de DQO, SST y Turbidez por EF	21
Figura N° 9. Relación media S/N para eliminación de la DQO	46
Figura N° 10. Relación media S/N para eliminación del SST	47
Figura N° 11. Relación media S/N para eliminación de Turbidez	47

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

	Pág.
DBO : Demanda Bioquímica de Oxígeno.....	1
DQO : Demanda Química de Oxígeno.....	1
SDT : Sólidos Disueltos Totales	1
H₂O₂ : Peróxido de Hidrógeno	2
SST : Sólidos Suspendidos Totales	2
Na₂S : Sulfuro de Sodio.....	3
(NaHS) : Sulfuro Ácido de Sodio.....	3
Fe²⁺ : Iones Ferrosos.....	5
Fe³⁺ : Iones Férricos.....	5
OH• : El radical hidroxilo	5
RH : Compuestos orgánicos.....	5
R• : Radicales orgánicos	5
EF : Electro-Fenton	6
Pt : Platino.....	11
BDD : Diamante Dopado con Boro	11
MSR : Metodología de Superficie de Respuesta.....	12
DCC : Diseño Compuesto Central.....	12
S/N : Señal Ruido.....	26

RESUMEN

En esta investigación se realizó el tratamiento de los efluentes proveniente de la Industria de Curtiembre, etapa pelambre, mediante la aplicación del proceso Electro-Fenton, se determinó la reducción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), Solidos Suspendidos Totales (SST) y Turbidez a través del uso de electrodos de Hierro (Cátodo) y Rutenio (Ánodo) así como la aplicación de la corriente eléctrica. Asimismo, se usaron dos diseños experimentales, Diseño Compuesto Central, DCC, y el Método Taguchi (diseño ortogonal), haciendo uso del software Statgraphics Centurion XVI.I (DCC) y Minitab Versión 18 (Taguchi). Ambos Softwares permitieron optimizar y modelar las variables según los niveles y el tipo de diseño. Se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) para analizar los datos y obtener la interacción entre las variables del proceso y las respuestas. Valores de (15.21%, 2.89% y 0.00%) R^2 ajustado y $p > 0.05$ (0.15, 0.35 y 0.69) determinaron que el modelo no fue estadísticamente significativo para la remoción de DQO, SST y Turbidez obtenidos por el DCC. Mientras que para el Taguchi se determinó, en termino de contribución de los parámetros, que el tiempo de reacción y la densidad de corriente con mayor contribución porcentual (85.42% y 12.16%), además de que los valores p (0.02 y 0.00) fueron menores del 0.05 lo que se determinó que para la remoción de DQO, ambos parámetros fueron significativos, en cuanto a las remociones del SST y Turbidez ninguno de los parámetros fue significativo. Por otra parte, la optimización de los factores para el Taguchi, indica remociones de DQO, SST y Turbidez de 87.77%, 91.24% y 100% respectivamente. Fue posible modelar la remoción de DQO a través del diseño experimental Taguchi, siendo los parámetros de densidad de corriente y tiempo de reacción los más influyentes en esta remoción. Las máximas remociones de DQO, SST y Turbidez fueron 87.77%, 91.24% y 100%.

Palabras clave: Efluentes de la industria de curtiembre; Electro-Fenton; DQO; SST; Turbiedad; DCC; MSR; Taguchi.

ABSTRACT

In this research, the treatment of effluents from the tanning industry, the liming stage, was carried out through the application of the Electro-Fenton process. The reduction of the Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solids (TSS) and Turbidity was determined through the use of Iron (Cathode) and Ruthenium (Anode) electrodes, as well as the application of electric current. Also, two experimental designs were used, Central Composite Design, DCC, and the Taguchi Method (orthogonal design), making use of the Statgraphics Centurion XVI.I (DCC) and Minitab Version 18 (Taguchi) software. Both softwares allowed to optimize and model the variables according to the levels and type of design. The analysis of variance (ANOVA) was used to analyze the data and obtain the interaction between the process variables and the responses. Values of (15.21%, 2.89% and 0.00%) adjusted R² and $p > 0.05$ (0.15, 0.35 and 0.69) determined that the model was not statistically significant for the removal of COD, TSS and Turbidity obtained by the CDD. While for Taguchi it was determined, in terms of parameter contribution, that the reaction time and current density with the greatest percentage contribution (85.42% and 12.16%), in addition to the p values (0.02 and 0.00) were less than 0.05, it was determined that for COD removal, both parameters were significant, in terms of TSS and Turbidity removals none of the parameters were significant. On the other hand, the optimization of the factors for Taguchi indicates COD, TSS and Turbidity removals of 87.77%, 91.24% and 100%, respectively. It was possible to model the removal of COD through the Taguchi experimental design, with the current density and reaction time parameters being the most influential in this removal. The maximum COD, TSS and turbidity removals were 87.77%, 91.24% and 100%.

Keywords: Effluents from the tanning industry; Electro-Fenton; COD; TSS; Turbidity; DCC; MSR; Taguchi.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente las industrias de curtiembre producen diariamente grandes volúmenes de aguas residuales, estos efluentes se caracterizan principalmente por tener concentraciones relativamente altas de contaminantes, lo que hace que su tratamiento sea difícil y costoso. Se estima que, para el curtido de piel de ovinos se usan alrededor de 200 - 300 litros de agua y en vacunos de 750 - 1000 litros, respectivamente (Portada, 2016, p. 48).

Según Dixit, et al., (2015, p. 39), la industria de la curtiembre tiene una influencia económica significativa, sin embargo, ocasionan un impacto negativo al medio ambiente debido a los desechos de curtiembre producidos durante el proceso. Así mismo, generan problemas de contaminación en el sistema de alcantarillado, estos efluentes se caracterizan por presentar altas concentraciones de sulfuros, cromo, Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), tintes, solventes, cloruros, Sólidos Disueltos Totales (SDT) y metales pesados (Lagos, 2016, p.14; Ramírez, et al., 2019, p. 36 & Dixit, et al., 2015, p. 39).

Además, alrededor del 60% de las pieles que ingresan a estas industrias son eliminados como residuos sólidos, es decir los efluentes también contienen grasas, fibras y pelo degradado, formando un 15% de descargas de aguas residuales (Sánchez, 2018, p. 4). Consecuentemente, los efluentes de curtiembre son uno de los más complejos en lo relativo a su tratamiento.

Al 2013 se estimó 92 industrias de curtiembre en el Perú: 14 en Lima, 48 en Trujillo y 30 en Arequipa; estas fábricas brindan servicio a 375 empresas. En el proceso de curtiembre la piel consume en promedio del 60 a 80% del cromo aplicado, el resto es descargado en el efluente (Córdova, et al., 2014, p. 184).

Por otra parte, sólo el 50% de estas industrias cumplen con las infraestructuras adecuadas, es decir muchas curtiembres no poseen la tecnología necesaria para descargar sus efluentes de manera correcta (Huamaní, 2014, p.3). Se debe recordar que las curtiembres deben cumplir con los Límites Máximos Permisibles vigentes en nuestro país (D.S. N° 003-2002-PRODUCE., ver Anexo 1).

El tratamiento de efluentes de curtiembre, reportado por la literatura incluye: Oxidación electroquímica Foto asistida (Selvaraj, et al., 2019, p. 2),

Electrocoagulación (Moradi, 2019, p. 1), tratamientos biológicos (Liu, et al., 2019, p. 1), Coagulación (Song, et al., 2004, p. 1) entre otros. Sin embargo, existen tratamientos avanzados como el Proceso Electro-Fenton que demostraron grandes avances y eficiencias para tratar aguas residuales de esta industria.

De acuerdo a la problemática expuesta, la presente investigación tiene por objetivo general: Optimizar los parámetros de densidad de corriente, tiempo y dosis de H_2O_2 en la remoción de DQO, SST y Turbiedad, del efluente, etapa de pelambre de la Industria curtiembre: y los objetivos específicos: Determinar la máxima eficiencia del Electro-Fenton en la remoción de DQO, SST y Turbiedad del efluente, etapa de pelambre de la Industria curtiembre y Modelar la remoción de DQO, SST y Turbiedad, del efluente, etapa de pelambre de la Industria curtiembre.

Por otra parte, la presente investigación pretende dar respuesta a la siguiente interrogante ¿Cuál son los parámetros óptimos relacionados a la máxima remoción de DQO, SST y Turbiedad, del efluente etapa de pelambre en la Industria curtiembre?, ¿Cuál es la máxima eficiencia del Electro-Fenton en la remoción de DQO, SST y Turbiedad, del efluente, etapa de pelambre de la Industria curtiembre?, y ¿Cuál son los modelos que mejor se ajustan a los datos experimentales de la remoción de DQO, SST y Turbiedad, del efluente de etapa de pelambre de la Industria curtiembre?.

Seguidamente la Hipótesis general propuesta es: Los máximos valores de densidad de corriente ($53,72 \text{ mA/cm}^2$), tiempo (120 min) y dosis de H_2O_2 (0.14 g/L) permitirán obtener la máxima remoción de DQO, SST y turbiedad y la hipótesis específica: El proceso Electro-Fenton permitirá obtener remociones de DQO, TSS y Turbiedad, del efluente, etapa de pelambre de la Industria curtiembre superiores a 90 % y Los modelos que se ajustan a los resultados experimentales en la remoción de DQO, SST y Turbiedad, del efluente, etapa de pelambre de la Industria curtiembre tienen un valor de R^2 ajustado mayor al 70%.

Este estudio tiene una justificación tecnológica y ambiental, ya que se pretende contribuir a una gestión favorable de los efluentes de la industria de curtiembre, mediante el estudio de la tecnología del Electro-Fenton, además este proceso es ambientalmente amigable con el ecosistema. 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, que se busca reducir los tiempos y costos del tratamiento con una alta eficiencia (García, 2014, p. 21). Así mismo, se presenta una metodología clara en la aplicación del proceso Electro-Fenton, con la finalidad de brindar una alternativa de tratamiento y cumplimiento con los (Límites Máximos Permisibles. ANEXO 1).

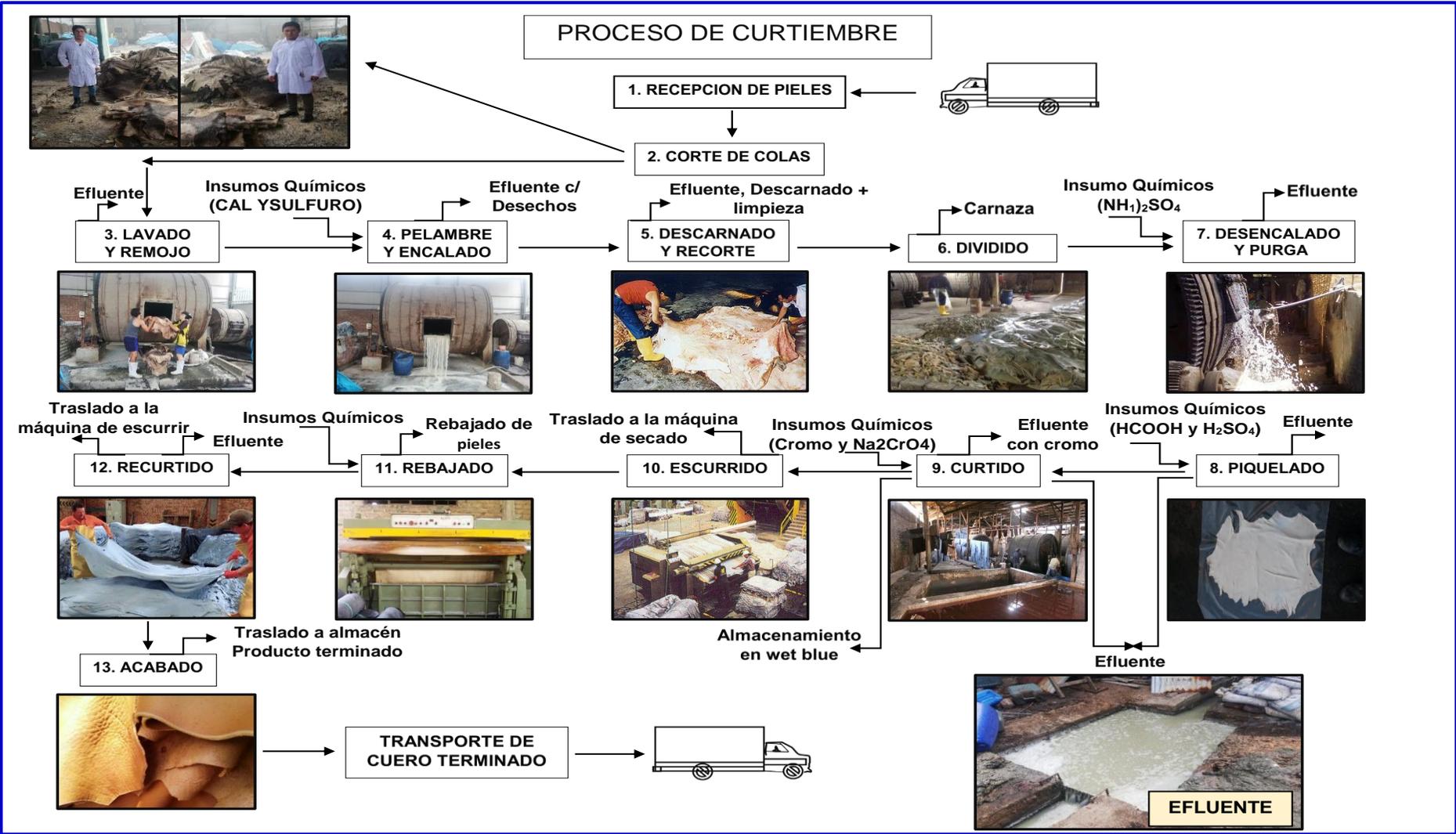
II. MARCO TEÓRICO

La industria de la curtiembre es la encargada de procesar las pieles de los animales recuperadas de los camales o aquellas que han sido acopiadas de los pequeños productores, para después transformarlas en cuero o peletería. Dicha actividad se realiza de manera informal y formal; y es esta última aquella que propone desarrollar alternativas para disminuir la contaminación con el uso apropiado de productos químicos amigables con el medio ambiente y la mejora de los procesos en la fabricación de cuero (Gómez. 2016, p. 13). Las técnicas utilizadas para curtir la piel varían en función del producto que se desea obtener. El proceso se divide en una serie de etapas, durante las cuales las pieles se van sometiendo a diversos procesos y se va tratando con diversos productos químicos (Espinoza, 2018. p. 4).

La composición del efluente puede variar mucho de una a otra curtiembre. Sin embargo, se observa elementos comunes como los altos contenidos de materia en suspensión, componentes oxidables, productos químicos y sustancias tóxicas, además del color oscuro y el olor desagradable. La etapa del pelambre, en el proceso de curtiembre, consiste en someter a las pieles a un tratamiento con una solución de sulfuros en medio alcalino, con el objetivo de separar el pelo de la piel, en este proceso se utilizan reactivos, sulfuro de sodio (Na_2S), sulfuro ácido de sodio (NaHS), y bases como cal o hidróxido de sodio y aminas, para mantener un $\text{pH} > 11$ y otros reactivos, como enzimas, que facilitan el proceso (Guzmán & Luján, 2010, p. 466). Esto hace que muchas investigaciones busquen mejorar la producción en la industria del cuero, haciéndolo eco amigable con la utilización de insumos y/o procesos que pueda sustituir en el procesamiento convencional del cuero, obteniendo así una posible disminución en el impacto generado en el medio ambiente (Espinoza, 2018. p. 29).

En la figura N° 1. Se presenta las principales etapas del proceso de curtiembre y los insumos químicos.

Figura N° 1. Principales etapas del proceso de curtiembre.



Fuente: Elaboración Propia

La producción del cuero se inicia mediante la separación de las fibras los cuales posteriormente pasaran a ser fibrillas en donde el cuero será preparado para una siguiente curtición. El pelo, epidermis se desprenden en la etapa de pelambre por la adición de sulfuros, que favorece el aumento de SST, DBO, DQO, Estas sustancias terminan siendo disueltas o suspendidas en el agua del proceso. Por ello, los efluentes y residuos de esta etapa contienen alta carga de contaminantes orgánicas y de las sustancias químicas utilizadas en el proceso. (Sánchez, 2018, p. 40).

El proceso Fenton ($\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2$) se ha utilizado ampliamente en el tratamiento de efluentes industriales, hay muchos temas de investigación relacionados en el campo del tratamiento de contaminantes aplicando esta tecnología (Li, et al., 2015, p. 1; Iskander, et al., 2019, p.2 Verma & Haritash, 2019, p. 1). Este proceso es uno de los métodos más efectivos y adecuados para la reducción de contaminantes orgánicos (Zhang, et al., 2019, p. 1). El método de oxidación de Fenton se utiliza principalmente para la degradación de compuestos orgánicos poco biodegradables por la reacción de sales ferrosas y peróxido de hidrógeno (Ledezma, et al., 2012, p. 42). Las tecnologías de oxidación avanzada se están consolidando como la opción más eficaz en el tratamiento de efluentes contaminados por sustancias recalcitrantes o tóxicas (Chiva, et al., 2017, p. 10-11).

El proceso de Fenton consiste en la generación de los radicales hidroxilos ($\text{OH}\bullet$) como resultado de la reacción del Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2) con iones ferrosos (Fe^{2+}), actuando como catalizadores y en condiciones ácidas (Tezcan, et al., 2015, p. 415), de acuerdo con la ecuación (1). (Casado, 2018, p. 1).

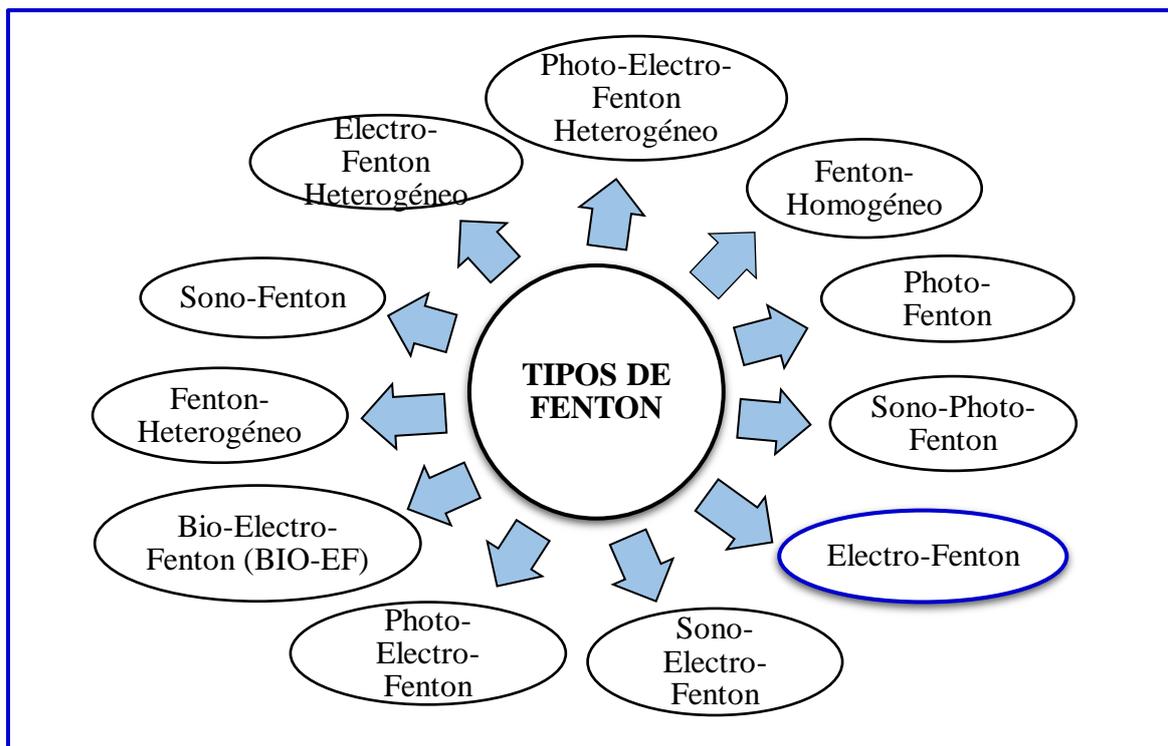


Estos $\text{OH}\bullet$ puede oxidar compuestos orgánicos (RH) mediante la abstracción de protones que producen radicales orgánicos ($\text{R}\bullet$), que son altamente reactivos y pueden oxidarse aún más, de acuerdo con la ecuación (2). (Venkatadri & Peters;1993, p. 109. Lin & Lo; 1997, p. 2051).



Existen diversas variaciones del Fenton, en la Figura N° 1 se presenta los principales tipos de Fenton, ubicando dentro ello el proceso Electro-Fenton.

Figura N° 2. Principales tipos de Fenton aplicados en el tratamiento de efluentes industriales.



Fuente: Elaboración propia

El proceso EF comprende la generación electroquímica in situ de H_2O_2 en el cátodo (ecuación 3) o en la agregación externa de este; y en la producción de Fe^{2+} en el ánodo de sacrificio (ecuación 4) y mediante la ecuación 1, se producen los $OH\cdot$. (Qiu, et al., 2015, p. 51; Oturan, et al., 2010, p.10605).



La regeneración del Fe^{2+} , en el proceso EF, es a través de la reducción del Fe^{3+} generado en el cátodo (ecuación 5) dando así una mayor electro-generación de los iones ferrosos a partir de los iones férricos, aumentando la eficiencia de las reacciones de cadena Fenton (Qiu et al., 2015, p. 52).



En la figura N° 3. Se presenta las principales reacciones que se dan en el proceso Electro-Fenton.

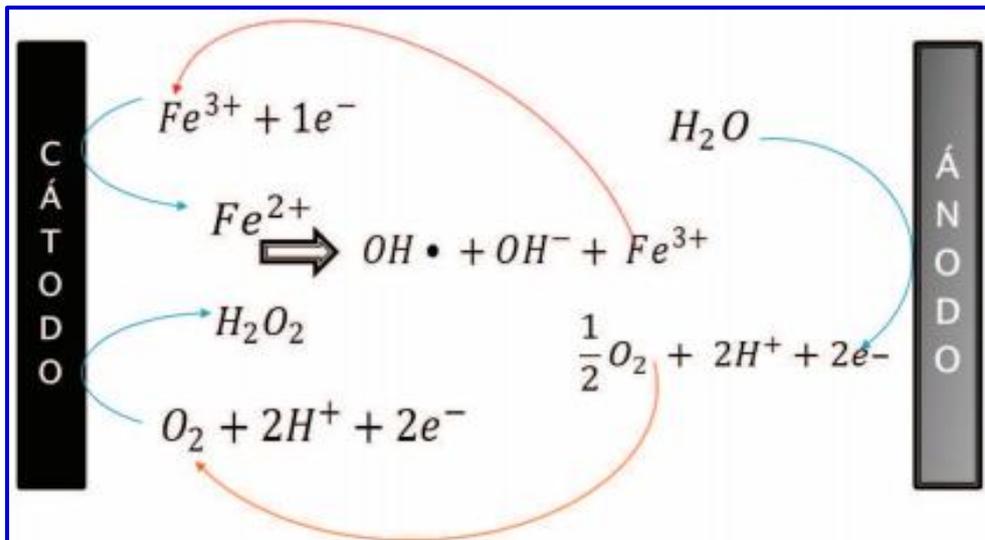
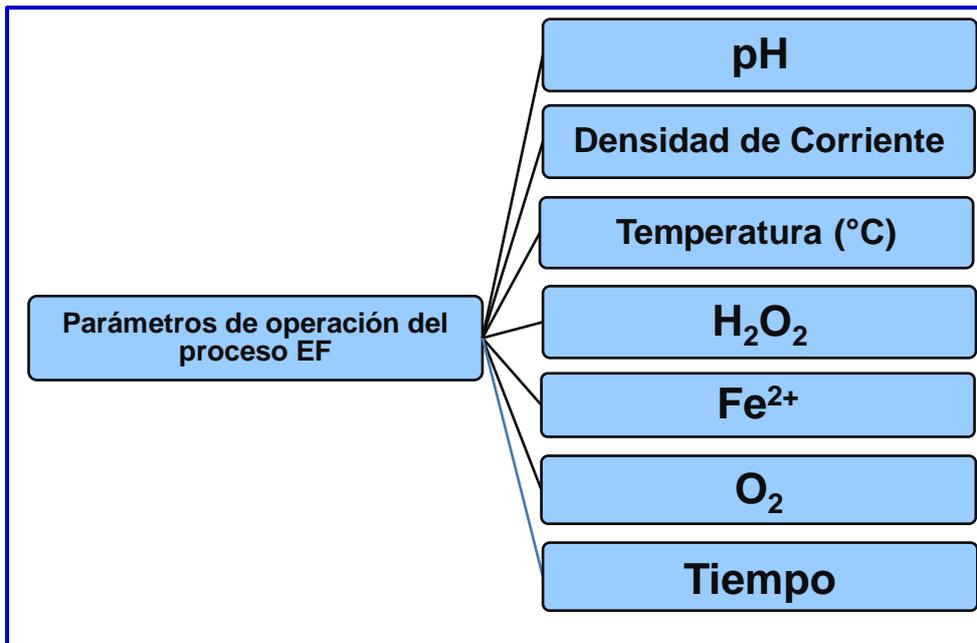


Figura N° 3. Reacciones electroquímicas presentes en el proceso Electro-Fenton. (Balladares, 2014, p. 23).

El proceso EF se ha convertido en la más prometedora entre las tecnologías electroquímicas, ya que, en contraste con el proceso convencional de Fenton, los reactivos de Fenton (H_2O_2 y Fe^{2+}) se generan de manera electro catalítica e in situ, en el cátodo del reactor (Huguenot, et al., 2015, p. 1 & Meijide, et al., 2018, p. 1). Por otra parte, el EF permite la mineralización de cualquier contaminante orgánico, en medio acuoso, a CO_2 , agua y especies inorgánicas a temperatura ambiente y presión atmosférica, además el EF permite el tratamiento de efluentes que contienen sustancias tóxicas, no biodegradables o persistentes que no pueden oxidarse mediante procesos convencionales; asimismo, dado que la electricidad se puede obtener de fuentes de energía limpia y el EF no utiliza reactivos peligrosos, este método se considera ecológico. (Casado, 2018, p. 2).

Asimismo, es importantes revisar los parámetros de mayor influencia en el EF. En la figura N° 4 se presenta los principales parámetros.

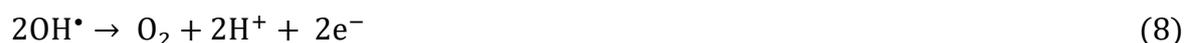


Fuente: Elaboración propia.

Durante el proceso EF es importante que el pH realice la modificación a las diferentes concentraciones de Hierro que se encuentran en una solución acuosa, los valores óptimos que debe mantenerse para la degradación de los contaminantes deben ser próximos a pH 3, por debajo de pH 2, se genera complejos de hierro, reduciendo las concentraciones de Fe^{2+} en la solución. Mientras que a valores de pH 4 comienzan a generarse el Fe^{3+} , siendo también desfavorable, ya que se retiran el catalizador de la solución. Entonces, a valores de pH superiores a 4 se producirá una menor generación de $\text{OH}\cdot$, a causa de la desaparición del Fe^{2+} , además, valores elevados de pH ocasionarían la descomposición del H_2O_2 , disminuyendo considerablemente la generación de $\text{OH}\cdot$. (Sánchez, 2015, p. 9). Por lo tanto, se puede concluir que los valores de pH óptimos están en un rango de 2 a 4 (Casado, 2018, p10).

Otro parámetro importante es la densidad de corriente (mA/cm^2) o fuerza impulsora; es la fuerza motriz para la reducción del oxígeno y la posterior generación de H_2O_2 , en el cátodo, ver ecuación (3). A mayores valores de densidad de corriente aumentara la cantidad de peróxido de hidrógeno, aumentando así, el número de $\text{OH}\cdot$ en el medio electrolítico y la regeneración más rápida del Fe^{2+} (ecuación 5). Por otra parte, La eficiencia de la corriente disminuye cuando la densidad de corriente aplicada es muy elevada ya que una mayor densidad de corriente también acelera la ocurrencia de reacciones secundarias, tales como la descarga de

oxígeno anódico (ecuación 6), la evolución del hidrógeno catódico (ecuación 7), y las reacciones parásitas del OH• (ecuación 8) (Sankara, et al., 2003, p. 777; Zhang, et al., 2007, p. 229 & He & Zhou, 2017, p. 15-16).



Asimismo, la temperatura de un sistema de reacción es un parámetro crucial, ya que está significativamente correlacionado con la velocidad de reacción. Es probable que el aumento en la temperatura acelere la velocidad de reacción entre H_2O_2 y Fe^{2+} , lo que aumenta la generación de OH• y la degradación de contaminantes. Asimismo, una temperatura inferior a 18,3 °C puede afectar negativamente la velocidad de reacción y la eficiencia de remoción (Deng & Englehardt, 2006, p. 8).

La concentración de H_2O_2 tiene una función muy importante en la eficiencia del Electro-Fenton, ya que influye directamente en la cantidad máxima teórica de OH• producido (Deng & Englehardt, 2006, p. 9). Este radical reacciona con las sustancias orgánicas, con una baja selectividad hacia las especies presentes. Las dosis óptimas de H_2O_2 que requiere la oxidación de un efluente determinado solo se puede establecerse mediante estudios específicos tanto en laboratorio como a escala piloto siendo función de la naturaleza y concentración de los contaminantes en el efluente (Sánchez, 2015, p. 10). Otros estudios científicos reportan la adición externa de H_2O_2 (Varank, et al., 2016, p. 12; Rahmani, et al., 2015, p. 420; Tezcan, et al., 2015, p. 416).

La concentración adecuada de Fe^{2+} es un requisito importante en el EF, generalmente, la eficiencia del proceso aumenta con la concentración de Fe^{2+} ya que está directamente relacionada a la generación del OH•. Estudios mostraron que el Fe^{2+} mejora el poder oxidante del H_2O_2 para destruir moléculas grandes, como los colorantes presentes en aguas residuales. (Wang, et al., 2010, p. 129 y Sánchez. 2015, p. 11). Sin embargo, la excesiva concentración de Fe^{2+} en la solución podrían consumir los OH• (ecuación 9) afectando de esta manera la eficiencia de remoción (Sánchez, 2015, p. 12).



La presencia de oxígeno es otro parámetro importante no sólo en el electro generación de H_2O_2 , sino también para la propagación de la reacción radical en cadena. Después del efecto inicial de los OH^{\bullet} en el contaminante orgánico, el O_2 se incorpora a los compuestos orgánicos, debido a su carácter molecular. En el caso de un bajo flujo de oxígeno, la solución no puede ser saturada en O_2 y la transferencia de oxígeno puede convertirse en la etapa limitante, afectando la tasa de producción de H_2O_2 y en consecuencia, también a la tasa de generación de OH^{\bullet} , por otra parte, al aumentar la producción de oxígeno puede aumentar la concentración de oxígeno disuelto y la tasa de transferencia de masa de oxígeno disuelto y en última instancia, aumentar producción de peróxido de hidrógeno (Casado, 2018, p 9-10; Monteil, et al., 2018, p. 21; y Elin & Purwanto, 2019, p. 2-3).

El tiempo de reacción es otro de los parámetros que mayor importancia tiene al momento de tratar los efluentes industriales. La cantidad de tiempo establecido puede ser mayor o menor dependiendo de las condiciones del objetivo buscado, en la mayoría de los casos como rango general el tiempo puede estar en torno de 60 a -120 minutos para un determinado experimento. Sin embargo, un aumento excesivo de este factor podría generar una deficiencia para los procesos EF (Sánchez, 2015, p. 13; & Shahheidar et al., 2018, p. 50-51).

Asimismo, existe materiales capaces de producir reacciones químicas a través de la aplicación de energía eléctrica, estos materiales son llamados Ánodos y Cátodos. Por lo tanto, en esta investigación se menciona los distintos tipos de materiales empleados por diferentes autores en sus investigaciones para el proceso EF.

En la figura N° 5 y 6. Se presenta la selección de los materiales tanto en el Ánodo y el Cátodo como uno de los pasos importantes en el proceso Electro-Fenton. (Nidheesh & Gandhimathi. 2012, p. 4).

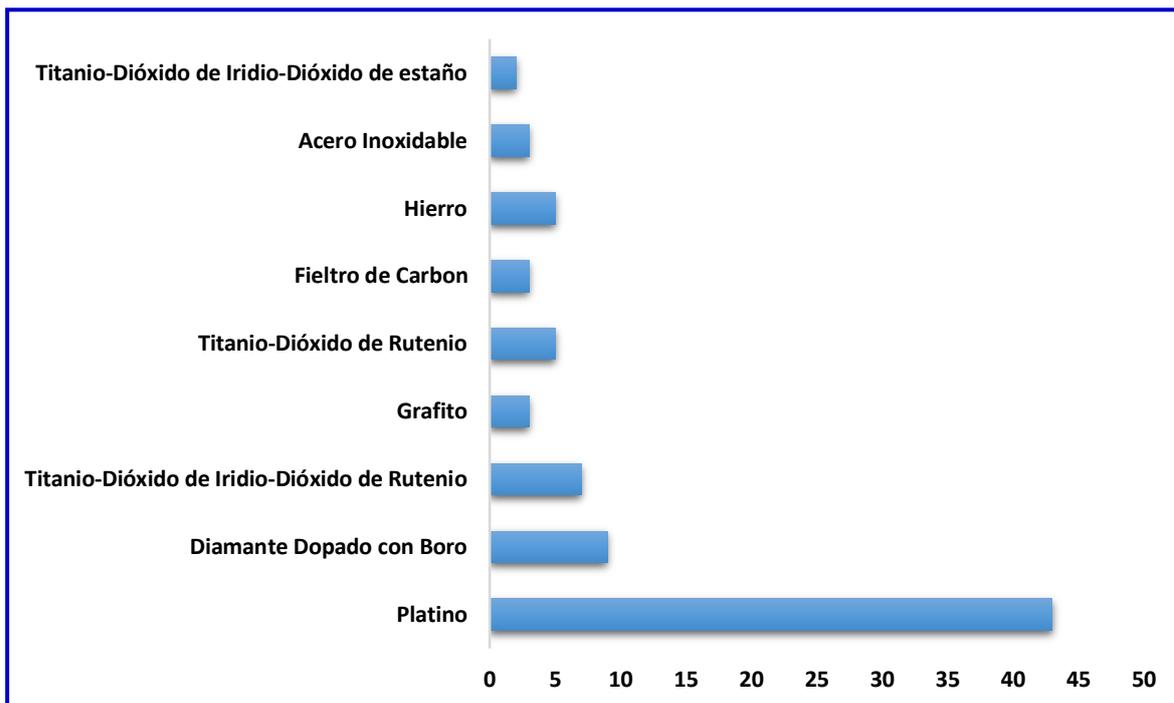


Figura N° 5. Tipos de ánodos usados en el proceso Electro-Fenton (Nidheesh & Gandhimathi. 2012, p. 4).

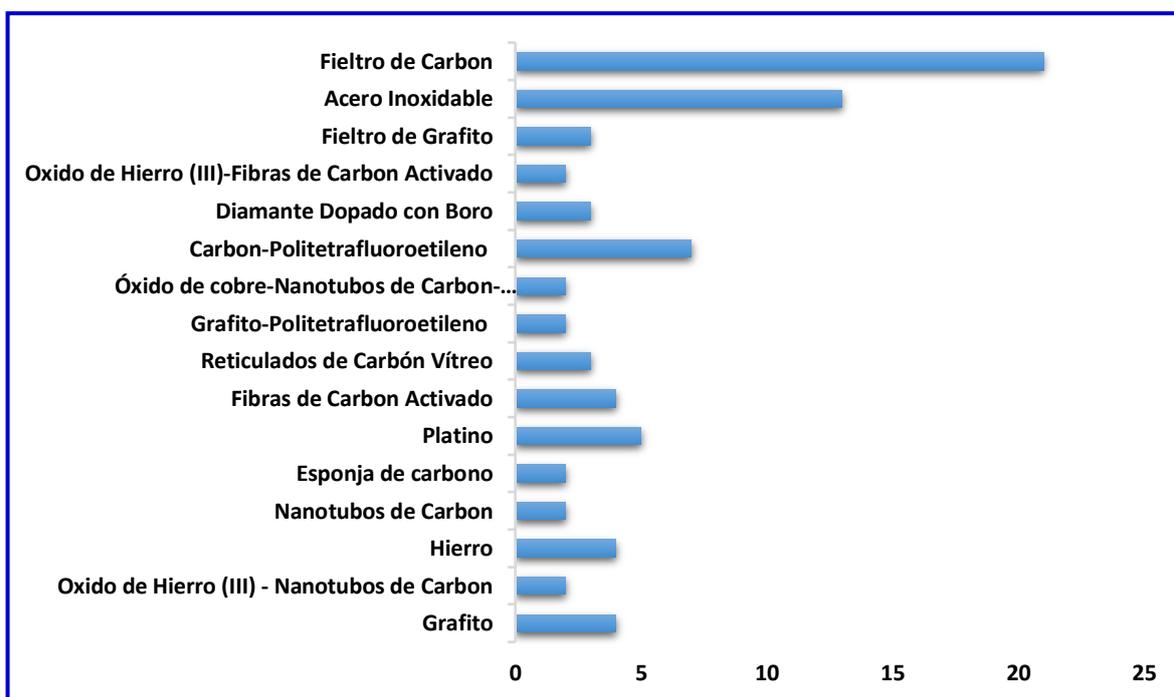


Figura N° 6. Tipos de cátodos usados en el proceso Electro-Fenton (Nidheesh & Gandhimathi. 2012, p. 4).

Los estudios científicos determinan que el uso de platino (Pt) y diamante dopado con boro (BDD), son los más empleados para la degradación de contaminantes en

el proceso Electro-Fenton como se muestra en la figura N° 4. El Pt se ha utilizado durante mucho tiempo como material de electrodo debido a su buena conductividad y estabilidad química incluso a altos potenciales y en medios muy corrosivos. (Panizza & Cerisola, 2009, p. 6546). Los materiales más empleados en el cátodo, en el proceso Electro-Fenton, es Filtro de Carbono y Acero Inoxidable, según como se muestra en la figura N° 5. Por otra parte, el uso del hierro como ánodo, figura (4) y cátodo figura (5) también han demostrado ser efectivos al momento de tratar contaminantes industriales ya que proporciona una buena conductividad de carga eléctrica. Así mismo, el uso de electrodo de hierro ha reportado altas eficiencias de eliminación de DQO (Tezcan, 2015, p. 417).

Asimismo, es importante revisar brevemente los diseños aplicados en el presente informe de investigación.

La metodología de superficie de respuesta (MSR) consta de una serie de métodos estadísticos y matemáticos que son útiles para generar métodos de mejora y optimizar procesos. Se usa con más frecuencia en el análisis de la relación y las influencias de los parámetros independientes sobre las variables respuestas (T.J.S.Anand, 2010, p. 1).

Una de las ramas de la (MSR) es el diseño compuesto central (DCC), el cual es muy eficiente para el ajuste y adecuación de un modelo de segundo orden y este se enfoca en la optimización de variables de respuestas que se pretende implantar (José, 2017, p. 208).

Método Taguchi, la principal ventaja de estos diseños radica en su simplicidad, fácil adaptabilidad a experimentos más complejos que involucran varios factores con diferentes números de niveles, proporcionan la información deseada con el menor número de experimentos y, sin embargo, producen resultados reproducibles con la precisión adecuada, estos métodos generalmente se emplean para estudiar los efectos principales y se aplican en la detección / experimento piloto (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012, p. 199).

En la Tabla N° 1. se presenta algunos antecedentes relacionados al proceso Electro-Fenton, y los principales parámetros de operación obtenidos de artículos científicos y tesis, brindando datos importantes para la presente investigación.

Tabla N° 1. Aplicación del proceso Electro-Frentón en diferentes tipos de efluentes Industriales.

AUTOR	PROCESO	TIPO DE EFLUENTE	PARÁMETRO DE OPERACIÓN	RESULTADOS
Cruz-Rizo, et al., 2017 7 pp.	Electro-Fenton	Aguas residuales de la curtiembre con tintes industriales	Densidad de corriente 8-31 mA/m ² ; Electrodos: BDD (Ánodo/Cátodo), pH 3, Tiempo para Blue BR: 120 min, Tiempo para Black TRS: 180 min, NaCl: 0.5 mM	Eliminación de Blue BR: 77% Eliminación de Black TRS: 80%
Liang, et al., 2016 11 pp.	Electro-Fenton heterogéneo	Aguas residuales degradación de naranja de metilo	Densidad de corriente de 50A/m ² . Electrodo: Ti/IrO ₂ -RuO ₂ (Ánodo). Grafito (GF) modificado con metal (Cátodo), pH 3, Temperatura ambiente Tiempo 120 m.	La degradación de naranja de metilo (MO). 99%.
Marin & Gonzales 2018 77 pp.	Electro-Fenton	Aguas residuales industriales	Densidad de Corriente 80-20-160-200 A/m; Electrodo: Fierro (Ánodo). Acero Inoxidable (Cátodo), Intensidad de Corriente: 2.204 -3.306-4.408 - 5.51, pH 3-3.20, Tiempo 60 minutos.	Remoción de Color 73.70%, a 50000 ppm de H ₂ O ₂ Remoción de DQO 72.97%, a 30000 ppm H ₂ O ₂ Turbidez 98.95%
Mousset, et al., 2016 7 pp.	Electro-Fenton	Micropollutantes de origen industrial	Densidad de corriente 1.25 mA/cm ² ; Electrodo: BDD (Ánodo), Fibras de carbono (Cátodo), pH 3, Tiempo 1.5 h – 3 h, Temperatura 35 ± 0.1°C, Volumen 0.4 L.	La eficiencia de eliminación de Fenol 98,5% y 99%.
Paramo-Vargas, et al., 2015 7 pp.	Electro-Fenton	Aguas residuales de una instalación de matadero	Densidad de corriente 2.5 mA/cm ² ; Electrodo: Ti-RuO ₂ , Ti-PdPtOx y BDD (Ánodo), CF (Cátodo), pH 3.5, Temperatura 23 ° C), Tiempo 60 m, Volumen 1L.	La eficiencia de DQO. 83.5%, 77.9% y 74.3%, de los 3 electrodos.
Radwan, et al., 2019 8 pp.	Electro-Fenton	Agua contaminada con benceno, tolueno y p-xileno (BTX)	Electrodo: Acero inoxidable, carbono y Níquel (Ánodo), Filtro de carbono (Cátodo), Intensidades de corriente 600mA, 400mA y 900mA, pH 3, Tiempo 60 m, Volumen 650 ml.	La eficiencia de remoción 95.4%, 88.7% y 87.6%
Rahmani, et al., 2015 10 pp,	Electro-Fenton	Aguas residuales sintéticas de cromo (VI)	Electrodos: Hierro (Ánodo/Cátodo), pH 3, Tiempo 25 m, Volumen 1 L, 25 y 50 ml/L H ₂ O ₂ .	La eficiencia máxima de eliminación de Cr (VI) 95% y 97%.
Sultana, et al” 2018 10 pp.	Electrooxidación y Electro-Fenton	Aguas residuales de cervecería	Densidad de corriente; 24 mA/cm ² , Electrodo: BDD (Ánodo). Grafito (Cátodo), pH 3, Temperatura ambiente 22 ± 2 ° C, Tiempo 6 h, Volumen 450 ml.	La eficiencia de DQO de 65, 91 y 98%.
Tezcan, et al., 2015 4 pp.	Electro-Fenton	Aguas residuales de papel de seda	Densidad de corriente; 20 mA/cm ² , 0.1M H ₂ O ₂ , Electrodo: Hierro (Ánodo/Cátodo), Tiempo 60 m, Volumen 0,5 L, pH 3.	La eficiencia de DQO. 80%.
Varank, et al., 2016 15 pp.	Electrocoagulación y Electro-Fenton.	Aguas residuales de la curtiembre	Densidad de corriente; 53,72 - 65 mA/cm ² , Electrodo: Hierro (Ánodo/Cátodo), pH 3.31 – 2.0, Tiempo 5 - 45 m, Volumen 600 ml, 0.14 – 0.06 g/L H ₂ O ₂ .	La eficiencia de DQO. 87.3%. TSS. 97%.

Fuente: Elaboración propia

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

Esta investigación es de tipo aplicada. La investigación aplicada, es la aplicación real del método y la investigación (Gómez, 2012, p. 84).

Asimismo, el diseño empleado es experimental (experimental Puro). Los experimentos puros son aquellos que reúnen los dos requisitos para lograr el control y la validez interna, grupos de comparación manipulación de la variable independiente y equivalencia entre estos (Hernández et al, 2017, p. 104).

El tipo de investigación es Cuantitativo. La investigación de tipo cuantitativo utiliza la recopilación de información para poner a prueba o comprobar las hipótesis mediante el uso de estrategias estadísticas basadas en la medición numérica, lo cual permitiría al investigador proponer patrones de comportamiento y probar los diversos fundamentos teóricos que explicarían dichos patrones (Hernández et al., 2010, p.4).

3.2. Variable y operacionalización

Las variables estudiadas fueron conformadas por una independiente y dependiente, cada uno mencionando su definición conceptual, definición operacional, dimensiones, indicadores y unidades según la tabla N° 14. (Anexo N° 14).

Variable independiente: Proceso Electro-Fenton: Densidad de corriente, Dosis de H₂O₂, Tiempo de reacción y Tipo de electrodos.

Variable dependiente: Tratamiento del Efluente Etapa Pelambre: Remoción de DQO, SST, Turbidez, pH y Conductividad Eléctrica.

3.3. Población, muestra y muestreo

Población: La población está constituida por efluentes de la industria de curtiembre de la etapa de pelambre, ubicada en el distrito de san juan de Lurigancho departamento de Lima, Provincia de Lima, con coordenadas geográficas de Longitud: O 76°58'17.36" Latitud: S 11°56'45.38". El volumen generado semanalmente es de 4.5 m³.

La muestra tomada fue 30 litros de efluentes de la etapa de pelambre, de la industria de curtiembre antes mencionada.

El muestreo fue aleatorio simple, considerando el Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes Resolución Ministerial N° 273-2013-VIVIENDA. La muestra fue conservada a una temperatura de 4 °C.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica utilizada fue la observación, asimismo se utilizaron diversos instrumentos de recolección de datos mostrado en la tabla N° 15 (Anexo N° 3).

3.5. Procedimientos

Inicialmente se caracterizó el efluente considerando algunos parámetros físico-químicos como se muestra en la tabla N° 13 (Anexo 1), comparándolo con el Límite máximo permisible para industria de curtiembre, D. S. N° 003 – 2002 – PRODUCE.

Los experimentos se realizaron en un vaso precipitación de 0,25 L a temperatura ambiente, como se muestra en la figura 7. Se realizó 27 corridas experimentales 18 experimentos para el diseño compuesto central y 9 experimentos según el diseño Taguchi.

En la figura N° 7. Se presenta los principales componentes de un sistema Electro-Fenton a nivel de laboratorio.

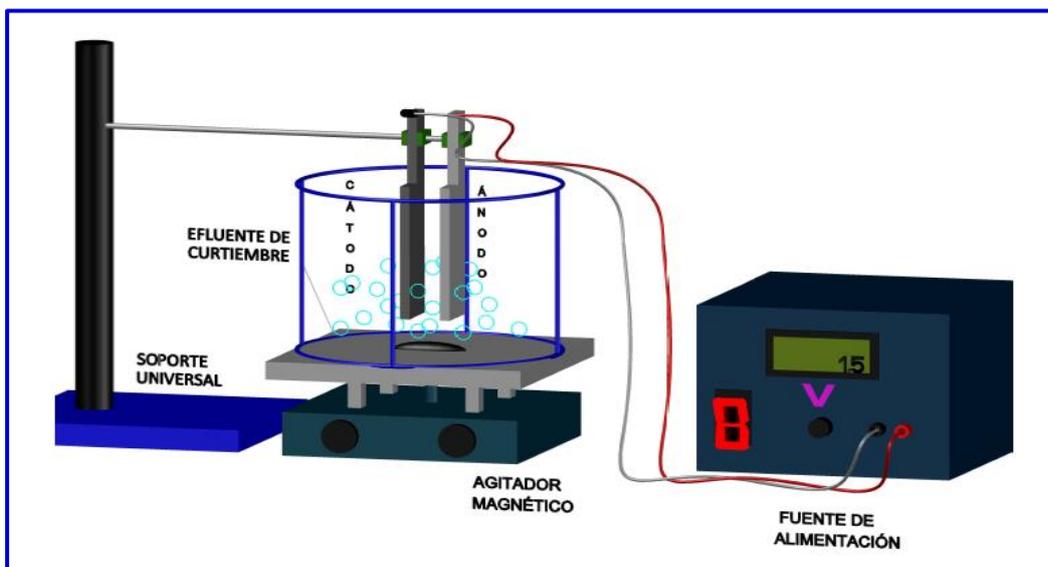


Figura N° 3. Diagrama esquemático del sistema Electro-Fenton: a) Fuente de energía, b) Soporte Universal, c) Agitador magnético y d) Electrodos.

Una placa de hierro fue utilizada como ánodo y una malla de rutenio fue utilizado como cátodo, ambas con una dimensión de 7,3 cm x 4,1 cm y con área total de 59,86 cm².

La distancia entre electrodos fue de 0,6 cm, se sumergieron en el vaso precipitado (el área efectiva fue de 36,9 cm²), el volumen del efluente de curtiembre por cada experimento fue de 0.2 L.

Se aplicó una densidad de corriente con un rango de 3,79 – 11,92 mA/cm² tabla N° 16 (Anexo N° 3), usando una fuente de corriente continua (INPUT 220 VAC 3-6 AMP MODE). Se mantuvo una agitación constante de 300 rpm usando un agitador magnético MS7-H550-Pro - DLAB, para comprobar e los valores de corriente se usó el Amperímetro analógico medidor DC 0-15 A 44C2. El tiempo de reacción fue controlado usando un cronómetro KUKULCAN. El pH se ajustó a un valor de 2,5–3 en todos los experimentos (pH-metro HANNA HI8424).

Luego de transcurrido de tiempo de reacción se procedió a elevar el pH a valores próximos a 11 (usando 7 ml de una solución NaOH, 1 M) y se agregó oxido de manganeso (0.0025 mg con agitación de 1 minuto), esto a fin de para detener la reacción, finalmente se dejó reposar 40 minutos dando por finalizado el experimento.

La secuencia de experimentos, niveles y codificación de parámetros analizados son presentados en las tablas 2 y 3 para DCC y tabla 4 y 5 para Taguchi.

Tabla N° 2. Variables codificadas del diseño de experimentos DCC para optimización del Electro-Fenton.

Factor	Niveles codificados				
	-2	-1	0	1	2
X ₁ Densidad de corriente (mA/cm ²)	3.79	5.42	7.58	9.75	11.92
X ₂ Tiempo de reacción (min)	6	10	14	18	22
X ₃ Dosis H ₂ O ₂ (mg/L)	0.00	55.5	111	166.5	222

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3. Diseño de experimentos DCC y respuestas para la remoción de DQO, SST y Turbiedad, mediante la optimización del Electro-Fenton.

Corrida	FACTORES			Respuesta 1 (%) de remoción DQO		Respuesta 2 (%) de remoción TSS		Respuesta 3 (%) de remoción Turbidez	
	Densidad de corriente	Tiempo de reacción	H ₂ O ₂ Dosis	Actual	Predicción	Actual	Predicción	Actual	Predicción
1	-1	-1	-1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
2	+1	-1	-1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
3	-1	+1	-1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
4	+1	+1	-1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
5	-1	-1	+1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
6	+1	-1	+1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
7	-1	+1	+1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
8	+1	+1	+1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
9	+2	0	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----
10	-2	0	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----
11	0	+2	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----
12	0	-2	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----
13	0	0	+2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
14	0	0	-2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
15	0	0	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----
16	0	0	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----
17	0	0	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----
18	0	0	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 4. Rango experimental de factores y niveles de matriz ortogonal (Taguchi).

Símbolo	Factor	Niveles codificados		
		1	2	3
X ₁	Densidad de corriente (mA/cm ²)	5,42	7,58	9,75
X ₂	Tiempo de reacción (min)	10	14	18
X ₃	Dosis H ₂ O ₂ (mg/L)	55.5	111	166.5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 5. Diseños ortogonales y niveles de tres factores (Taguchi) para la optimización del Electro-Fenton.

FACTORES				RESPUESTA					
Corridas	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Tiempo (min)	H ₂ O ₂ (mg/L)	Valores Actuales			Predichos		
				(%) DQO	(%) SST	(%) Turbidez	(%) DQO	(%) SST	(%) Turbidez
1	1	1	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
2	1	2	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
3	1	3	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
4	2	1	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----
5	2	2	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
6	2	3	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
7	3	1	3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
8	3	2	1	-----	-----	-----	-----	-----	-----
9	3	3	2	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Fuente: Elaboración propia.

3.6. Método de análisis de datos

Se realizó la comparación del Diseño Compuesto Central, CCD, y el Método Taguchi (diseño ortogonal), haciendo uso del software Statgraphics Centurion XVI.I (CCD) y Minitab Versión 18 (Taguchi).

La aplicación de ambos Softwares permitió optimizar y modelar las variables según los niveles y el tipo de diseño.

El uso del análisis de varianza (ANOVA) en ambos diseños permitió determinar las interacciones sobre las variables de respuesta, así como la significancia de los efectos principales. La calidad del modelo polinomial se expresó mediante el coeficiente de determinación (R^2 ajustado) y su significancia estadística es verificado mediante la prueba F de Fisher. Los términos del modelo fueron evaluados por el p -valor y el f -valor. (Varank, et al., 2016, p. 4). En el diseño de Taguchi se ajustó en la relación (S/N) con la opción “más grande es mejor” ($S/N = -10 \cdot \log(\sum(1/Y^2) / n)$) para determinar los valores predichos para cada respuesta (Asghar, et al., 2014, p. 9).

3.7. Aspectos éticos

Para la investigación se tuvo en cuenta las políticas de la universidad y el Manual de referencias ISO 690 y 690-2, respetando así los derechos de autor, Nacional e Internacional, de tal manera que se evitó afectar la credibilidad de los resultados. Por consiguiente, se hizo posible su desarrollo y factibilidad, además de que se contó con los recursos necesarios para su desarrollo del Informe de investigación.

IV. RESULTADOS

4.1. Diseño de Compuesto Central (DCC)

Sobre la base de los resultados del diseño experimental, las ecuaciones de regresión obtenidas en el EF, aplicando el DCC se presentan en las ecuaciones 10, 11 y 12 para la remoción de DQO, SST y turbidez respectivamente:

$$\begin{aligned} \% \text{Remoción de DQO} = & 36.6782 + 0.733352 \text{ Densidad de Corriente} + 0.742969 * \\ & \text{Tiempo de Reacción} + 0.011903 * \text{Dosis } H_2O_2. \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \% \text{Remoción de SST} = & 96.5321 + 0.0175135 * \text{Densidad de Corriente} + \\ & 0.0798437 * \text{Tiempo de Reacción} + 0.00609234 * \text{Dosis } H_2O_2. \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \% \text{Remoción de Turbidez} = & 90.3029 + 1.18359 * \text{Densidad de Corriente} - \\ & 0.283281 * \text{Tiempo de Reacción} - 0.00600225 * \\ & \text{Dosis } H_2O_2. \end{aligned} \quad (12)$$

Asimismo, en la tabla 6 se presentan los valores observados y predichos de las eficiencias de eliminación de DQO, SST y Turbidez, obtenidos mediante las ecuaciones antes mencionadas. Los máximos valores observados de remoción, de estos tres parámetros, se encuentran entre 62.13%, 99.85% y 100%.

El ANOVA de los parámetros de regresión del modelo cuadrático se muestran en la tabla N° 7. Se observa valores F de 2.02, 1.17 y 0.49, para los modelos de remoción de DQO, SST y Turbidez, respectivamente. Así mismo, valores p de 0.15, 0.35 y 0.69 para los mismos modelos.

En la figura 8(a-i) se presentan las superficies de respuesta obtenidas con el DCC para la remoción de DQO, SST y Turbidez, respectivamente.

Tabla N° 6. Valores observados y predichos de la remoción de DQO, SST y Turbidez, mediante la optimización del Electro-Fenton con el DCC.

FACTORES				Respuesta 1		Respuesta 2		Respuesta 3	
				(%) Remoción de DQO		(%) Remoción de TSS		(%) Remoción de Turbidez	
Corrida	Densidad de corriente	Tiempo de reacción	H ₂ O ₂ Dosis	Observado	Predicción	Observado	Predicción	Observado	Predicción
1	5.42	10	55.5	42.35	47.59	97.35	97.76	100	91.94
2	9.75	10	55.5	48.15	54.82	95.13	96.43	100	100.13
3	5.42	18	55.5	50.52	56.53	98.60	99.05	98.48	90.57
4	9.75	18	55.5	50.30	52.89	98.66	98.87	94.04	94.88
5	5.42	10	166.5	41.70	44.81	98.46	98.74	100	89.95
6	9.75	10	166.5	55.68	55.39	99.21	99.26	100	98.70
7	5.42	18	166.5	59.58	58.61	99.38	97.57	100	90.66
8	9.75	18	166.5	57.83	58.32	99.16	99.25	96.69	95.54
9	11.92	14	111	57.61	55.47	98.46	97.88	89.91	86.92
10	3.79	14	111	54.60	49.93	97.77	97.86	62.76	78.63
11	7.58	22	111	57.83	56.62	98.46	98.72	93.71	97.88
12	7.58	6	111	49.23	44.72	98.23	97.45	97.38	102.4
13	7.58	14	222	55.25	56.93	98.92	99.35	91.26	97.56
14	7.58	14	0.00	61.70	54.29	98.95	98.00	96.01	98.90
15	7.58	14	111	58.47	56.18	99.85	99.00	99.60	97.38
16	7.58	14	111	57.83	56.18	98.56	99.00	94.00	97.38
17	7.58	14	111	50.95	56.18	98.67	99.00	91.05	97.38
18	7.58	14	111	62.13	56.18	99.45	99.00	99.37	97.38

Fuente: Elaboración propia.

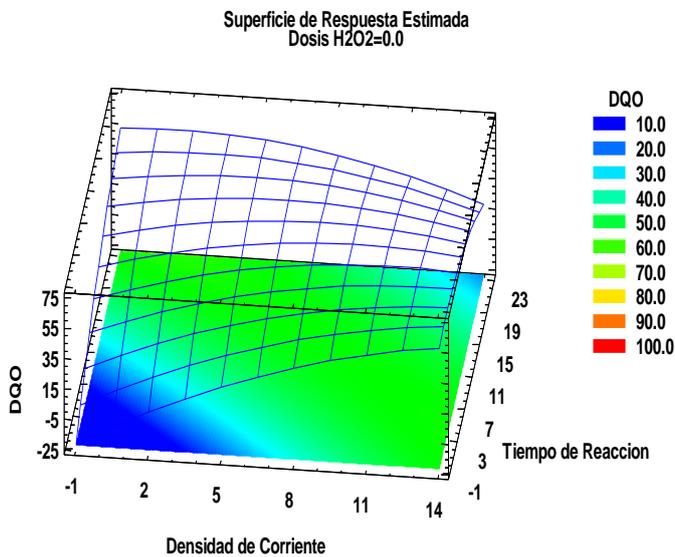
Tabla N° 7. Resultados del ANOVA para el DCC

Modelo	R ²	R2 Ajustado	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Valor > P
DQO	30.17	15.21	186.30	62.10	2.02	0.15
SST	20.03	2.89	3.48	1.16	1.17	0.35
Turbidez	9.45	0.00	121.33	40.44	0.49	0.69

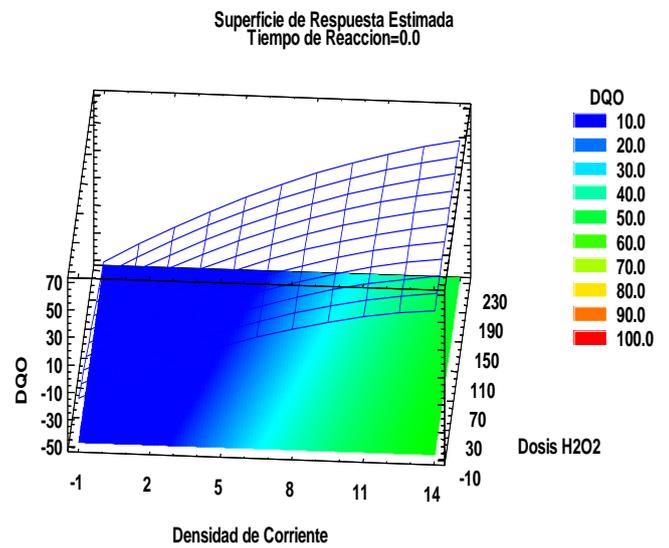
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 8. Superficie de respuesta tridimensional para la remoción de DQO, SST y Turbidez por EF.

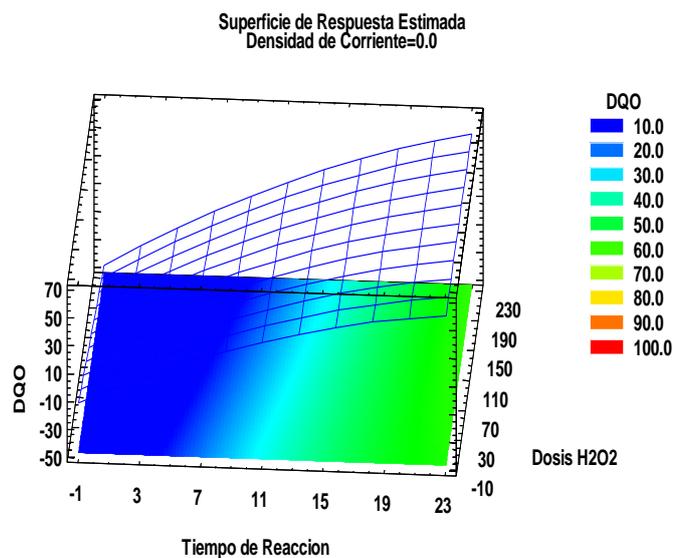
(a)



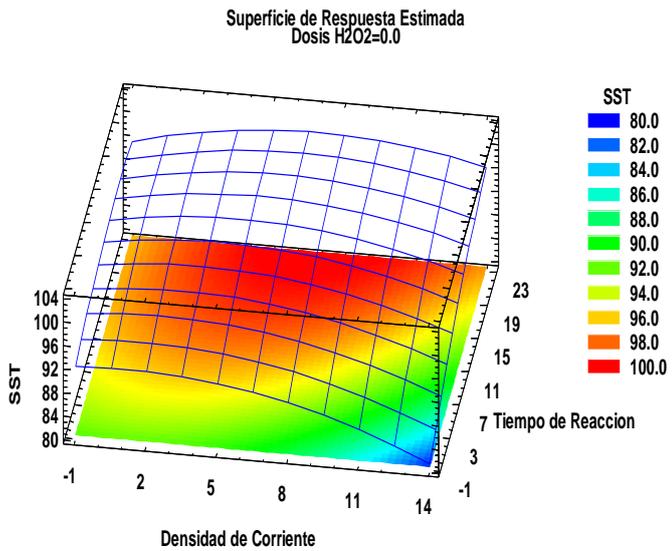
(b)



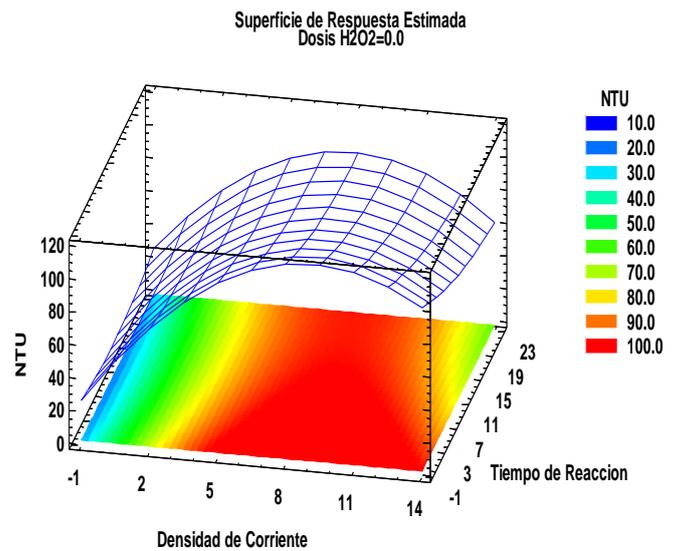
(c)



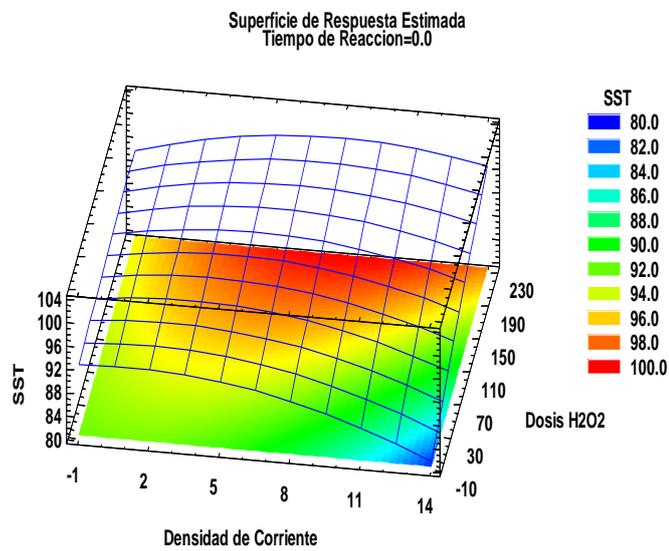
(d)



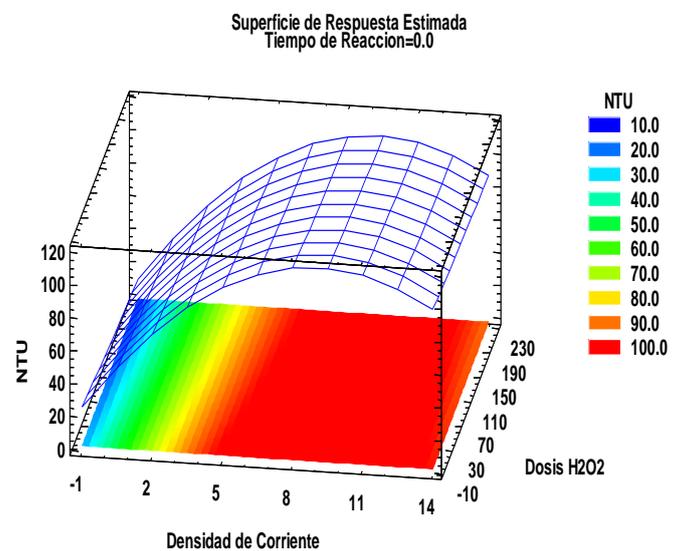
(g)



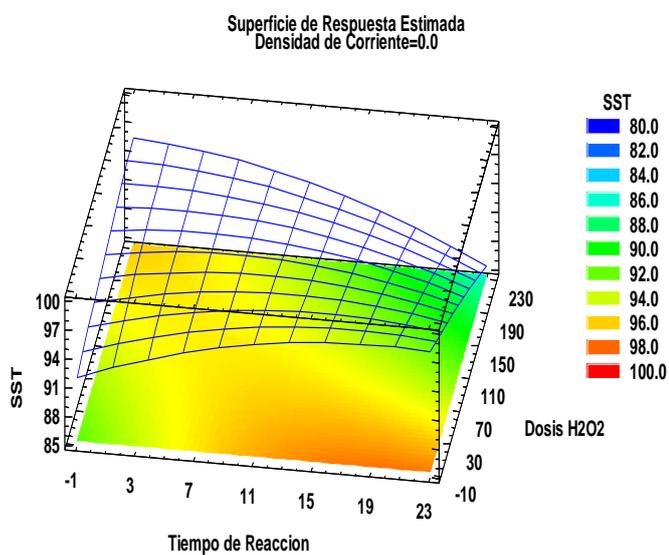
(e)



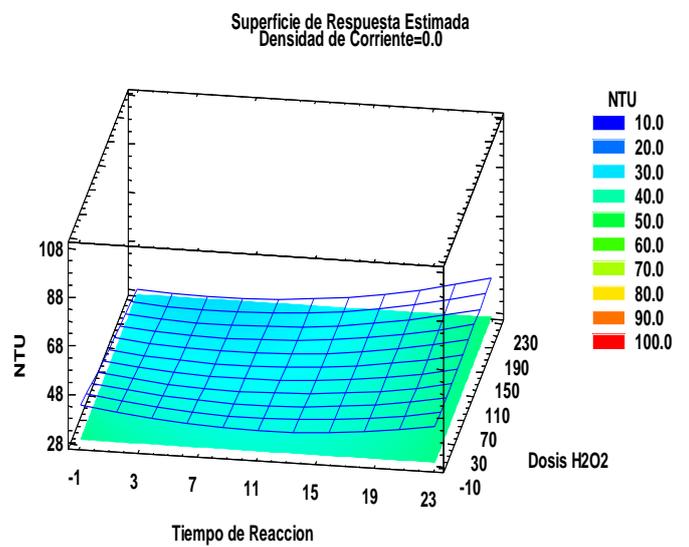
(h)



(f)



(i)



Las condiciones óptimas y los valores predichos de los modelos se presentan en la tabla N° 8. Se utilizó la optimización numérica basada en la combinación de los niveles y factores para la remoción de DQO, SST y Turbidez por el proceso EF. Como puede verse en esta Tabla, las condiciones óptimas en función a la densidad de corriente, tiempo y dosis de H₂O₂ mostraron un 63.20% de remoción para el DQO, 100 % para el SST y 100 % para la Turbidez.

Tabla N° 8. Condiciones óptimas de las variables del proceso Electro-Fenton.

Densidad de corriente (mA/cm ²)	Tiempo (min)	H ₂ O ₂ (ml/L)	Respuestas previstas		
			DQO (%)	SST (%)	Turbidez (%)
5.41	22.0	222.0	63.20		
9.62	8.42	222.0		100	
8.83	6.00	0.007			100

Fuente: Elaboración propia.

Las condiciones óptimas presentadas en esta tabla surgieron a partir de los modelos presentados en las ecuaciones 10-12, con valores de R² ajustado de 15.21% para la DQO, 2.89% para el SST y 0.00% para la turbidez.

4.2. Diseño Experimental Taguchi

A continuación, se presentan los resultados respecto a la aplicación del método de Taguchi para determinar las condiciones óptimas en el EF y hacer una comparación con los resultados obtenidos con el DCC.

Sobre la base de los resultados de este diseño experimental, se obtuvieron las ecuaciones (13.), (14) y (15).

$$\% \text{Remoción de DQO} = 40.70 + 0.480 \text{ Densidad de corriente} + 1.021 \text{ Tiempo de reacción} - 0.0019 \text{ Dosis } H_2O_2 \quad (13)$$

$$\% \text{Remoción de SST} = 96.78 - 0.082 \text{ Densidad de corriente} + 0.0188 \text{ Tiempo de reaccion} + 0.00541 \text{ Dosis } H_2O_2 \quad (14)$$

$$\% \text{Remoción de Turbidez} = 124.1 - 0.95 \text{ Densidad de corriente} - 1.64 \text{ Tiempo de reacción} - 0.0406 \text{ Dosis } H_2O_2 \quad (15)$$

Los resultados experimentales para cada corrida experimental, así como los resultados predichos por los modelos se presentan en la tabla N° 9. Los máximos valores de remoción se encuentran entre 64.92%, 97.94% y 98.96%, para DQO, SST y Turbidez. Así mismo, los niveles de tres factores (S/N) y resultados experimentales se ven en la Tabla N° 20 (Anexo 5).

En la tabla N° 21 (Anexo N° 6), se presenta el resultado del ANOVA, de la remoción de DQO, SST y Turbidez. Así mismo, estos valores de remoción fueron ajustados según la contribución de cada parámetro evaluado, excluyéndose los parámetros con porcentajes de contribución menores al 15% (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012, p. 217). El ANOVA ajustado según el criterio anterior se muestran en la tabla N° 10. Los resultados muestran que los parámetros de mayor contribución fueron Tiempo de Reacción y Dosis de H_2O_2 . Además, en la tabla N° 11, se presenta la contribución de cada parámetro evaluado en la respuesta para la relación señal-ruido (S/N)., además de que las figuras 9-11 (Anexo N° 6) muestran el efecto de la remoción de DQO, SST y Turbidez en términos de proporción S/N , confirmando los resultados obtenidos en el ANOVA (tabla 10).

Tabla N° 9. Valores observados y predichos de la remoción de DQO, SST y Turbidez, mediante la optimización del Electro-Fenton con el diseño Taguchi.

Corrida	FACTORES			Respuesta 1		Respuesta 2		Respuesta 3	
				(%) Remoción de DQO		(%) Remoción de TSS		(%) Remoción de Turbidez	
	Densidad de corriente	Tiempo de reacción	H ₂ O ₂ Dosis	Observado	Predicción	Observado	Predicción	Observado	Predicción
1	5.42	10	55.5	54.82	53.41	96.13	96.82	97.68	100.30
2	5.42	14	111	57.83	57.38	97.77	97.20	92.70	91.48
3	5.42	18	166.5	61.48	61.36	97.94	97.57	92.91	82.67
4	7.58	10	111	52.45	54.34	97.67	96.95	98.96	95.99
5	7.58	14	166.5	57.83	58.32	96.26	97.32	68.79	87.18
6	7.58	18	55.5	61.05	62.61	96.36	96.80	82.80	85.13
7	9.75	10	166.5	55.68	55.27	96.94	97.07	98.19	91.68
8	9.75	14	55.5	59.76	59.57	96.94	96.54	92.94	89.62
9	9.75	18	111	64.92	63.55	96.89	96.92	79.78	80.81

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 10. Análisis de Varianza (ANOVA) ajustados para la remoción de DQO, SST y Turbidez.

Factores	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F Valor	P Valor	% de Contribución
% DQO						
Densidad de Corriente	2	14.24	7.12	10.05	0.02	12.16
Tiempo de Reacción	2	100.05	50.02	70.60	0.00	85.42
% SST						
Densidad de Corriente	2	0.41	0.20	0.46	0.66	11.48
Dosis de H ₂ O ₂	2	1.41	0.70	1.56	0.31	38.73
% Turbidez						
Densidad de Corriente	2	182.2	91.09	1.22	0.38	21.85
Tiempo de Reacción	2	353.2	176.72	2.37	0.20	42.39

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 11. Tabla de respuesta para la relación señal-ruido (S/N).

Nivel	Densidad de Corriente	Tiempo de Reacción	Dosis de H ₂ O ₂
Remoción DQO			
1	35.27	34.70	35.34
2	35.12	35.34	35.30
3	35.56	35.91	35.31
Delta	0.45	1.22	0.05
Clasificar	2	1	3
Remoción SST			
1	39.76	39.73	39.69
2	39.71	39.73	39.77
3	39.73	39.74	39.74
Delta	0.05	0.01	0.09
Clasificar	2	3	1
Remoción Turbidez			
1	39.50	39.85	39.17
2	38.34	38.49	39.10
3	39.08	38.59	38.65
Delta	1.16	1.36	0.52
Clasificar	2	1	3

Fuente: Elaboración propia.

Las condiciones óptimas de funcionamiento de las variables del proceso de Taguchi se presentan en la tabla N° 12. Como puede verse, las condiciones óptimas en función a la densidad de corriente, tiempo y dosis de H₂O₂ mostraron un 87.77% de remoción para el DQO, 91.24 % para el SST y 100 % para la Turbidez.

Tabla N° 12. condiciones óptimas de funcionamiento de las variables del proceso de Taguchi.

Densidad de corriente (mA/cm ²)	Tiempo (min)	H ₂ O ₂ (ml/L)	Respuestas previstas		
			DQO (%)	SST (%)	Turbidez (%)
9.75	18	55.5	87.77		
5.42	18	111		91.24	
5.42	10	55.5			100

Fuente: Elaboración propia.

Las condiciones óptimas surgieron a partir de los modelos presentados en las ecuaciones 13-15, con valores de R² ajustado de 95.16% para la DQO, 0.42% para el SST y 28.47% para la turbidez.

V. DISCUSIÓN

5.1. Diseño compuesto central (DCC).

Los modelos obtenidos en las ecuaciones 10-12 evaluados mediante el ANOVA (tabla N° 7) indican que estos modelos no se ajustan a los datos experimentales debido a que los valores de R² ajustado para la remoción de DQO, SST y Turbidez fueron de 15.21%, 2.89 % y 0.00%. Se observa, además, que los valores p de los modelos son superiores a 0.05, lo que indica que el modelo es estadísticamente no significativo (Fukuda, et al., 2018, p. 9). Esto también es observado comparando los resultados experimentales y predichos (tabla N° 6).

Las gráficas de superficie de respuesta obtenidas por el DCC presentadas en la figura 8 (a-i), proporcionaron una visión tridimensional para la remoción de DQO, SST y Turbidez, en combinación con las diferentes variables independientes. En las figuras 8 a-c, la remoción del DQO presenta valores máximos de 60% y 70% en combinación con sus factores, según las figuras 8 b-c a mayor tiempo de reacción y mayor densidad de corriente mayor remoción de DQO. Así mismo, las figuras 8 d-f, indicaron que, con altos valores de densidad de corriente, tiempo de reacción y dosis de H₂O₂ se obtiene un efecto mayor en la remoción de SST permitiendo alcanzar remociones de hasta 100%. Por otra parte, las interacciones de los parámetros presentados en las figuras 8 g-h determina que a valores altos de densidad de corriente (con la interacción del tiempo reacción y las dosis de H₂O₂),

mejores resultados se obtienen para la remoción de la turbidez y que la interacción del tiempo de reacción y dosis de H_2O_2 no influyen en la remoción de este parámetro. Sin embargo, según el ANOVA (ver tabla N° 17-19, ANEXO N°4), ningún parámetro presentó efectos significativos ($p > 0.05$) sobre las variables respuestas evaluadas.

La interacción de los factores de densidad de corriente (7.58 mA/cm^2), tiempo de reacción (14 min) y dosis de H_2O_2 (111 ml/L) permitieron alcanzar remociones de 62.13% de DQO, estos valores son comparados con los resultados obtenidos por Kurt, et al., (2007, p. 35), quienes reportaron remociones de DQO del 73%, en un período de tiempo de 12 min, con energía aplicada de 15.0 W, la dosis de 1670 mg/L H_2O_2 y pH de 3. Se debe aclarar que para este estudio las dosis aplicadas (111 ml/L) de H_2O_2 fueron superiores y los valores (7.58 mA/cm^2) de densidad de corriente fueron inferiores.

Así mismo, para la remoción de SST, las interacciones de los factores de densidad de corriente (7.58 mA/cm^2), tiempo de reacción (14 min) y dosis de H_2O_2 (111 ml/L) permitieron alcanzar remociones del 99.85%, siendo esto comparados con los resultados obtenidos por Rabbani, et al., (2014, p. 210-212), quienes realizaron el tratamiento de lixiviados usando el proceso EF, los cuales mediante la aplicación de dosis de 2000 mg/L^{-1} de H_2O_2 , corriente eléctrica de 1.5 A y tiempo de reacción de 40 minutos obtuvieron una eficiencia de remoción de SST del 92.4%. Se determina que para nuestro estudio los valores de tiempo de reacción (14 min), dosis de H_2O_2 (111 ml/L) y corriente eléctrica (7.58 mA/cm^2) fueron inferiores.

Por otra parte, los valores obtenidos para la remoción de Turbidez los factores de densidad de corriente (5.42 mA/cm^2), tiempo de reacción (10 min) y dosis de H_2O_2 (55.5 ml/L) permitieron alcanzar remociones hasta un 100%. En comparación con los resultados obtenidos por Borba, et al., (2014, p. 47-48), quienes hicieron la evaluación de la eliminación de contaminantes de los efluentes de las curtidurías manejados por el proceso EF, donde a condiciones iniciales de pH inicial = 4; $[\text{H}_2\text{O}_2] = 6 \text{ g L}^{-1}$; densidad de corriente de 2A y tiempo de tratamiento de 120 min se logró una eficiencia de remoción del 90% de la Turbidez. Mediante la comparación de resultados se determinó que para nuestro estudio los valores de densidad de corriente (5.42 mA/cm^2) y tiempo reacción (10 min) fueron inferiores.

En cuanto a las condiciones óptimas presentados en la Tabla N° 12 no se realizó un análisis a los puntos óptimos del modelo central debido a que los modelos no se llegaron ajustar a los datos experimentales.

5.2. Diseño Taguchi.

Los modelos ajustados en las ecuaciones 13-15 evaluados mediante el ANOVA (tabla N° 10) determinaron que los valores de p en la remoción de DQO son menores del 0.05, indicando que el modelo fue significativo. Sin embargo, para la remoción de SST y Turbidez los modelos no se llegaron ajustar ya que los valores de p eran superiores al 0.05 lo que indico que los modelos no fueron estadísticamente significativos respectivamente.

En comparación, el análisis ANOVA obtenidos por el DCC a través de los parámetros de densidad de corriente, tiempo de reacción y dosis de H_2O_2 para las remociones de DQO, SST y Turbidez no presentaron valores significativos (ver tablas N° 17-19. Anexo N° 4), sin embargo, para el Taguchi si hubo significancia del tiempo de reacción y densidad de corriente en la remoción de DQO mientras que para la remoción de SST y Turbidez los parámetros no fueron significativos (ver Tabla N° 10). La contribución de cada parámetro también es reportada en la tabla N° 11, esta contribución es evaluada para la relación señal-ruido (S/N).

La máxima remoción de DQO se obtuvo con el máximo valor (9.75 mA/cm^2) de densidad de corriente y el máximo valor (18 min) de tiempo de reacción. A mayores valores de densidad de corriente mayor generación de H_2O_2 y por ende mayor presencia de OH^\bullet . Igualmente, a mayores valores de tiempo de reacción mejor rendimiento para la remoción.

Los valores óptimos correspondientes a los parámetros evaluados se muestran en la Tabla N° 12. Estos valores óptimos para la remoción de DQO, SST y Turbidez fueron obtenidos a partir de los modelos presentados en las ecuaciones 13-15. Siendo así que el modelo para la remoción de DQO fue significativo mientras para la remoción de SST y Turbidez los modelos no presentaron significancia. En cuanto a la comparación con el DCC los modelos obtenidos en las ecuaciones 10-12 no se llegaron ajustar a los datos experimentales por lo que los valores óptimos para las remociones de DQO, SST y Turbidez no fueron significativos.

Se hace la comparación de la remoción del DQO con los valores obtenidos por Ziati et al., (2018, p. 117), quienes removieron DQO de las aguas residuales de curtiembre mediante el proceso fenton, lograron obtener un 87% de remoción de DQO en condiciones: 2×10^{-3} mol/L de Fe^{+2} , 10-2 mol/L de H_2O_2 , pH ácido (3.5) y tiempo de 60 minutos. Así mismo, en este estudio se llegó a obtener un 87% de remoción de DQO en condiciones óptimas de 9.75 mA/cm², 55.5 ml/L de H_2O_2 y tiempo de 18 minutos.

La remoción del SST obtenido en este estudio fue comparada con los resultados obtenidos por Varank, et al., (2016, p. 12), quienes hicieron la optimización estadística de los parámetros de proceso para el tratamiento de las aguas residuales de las curtidurías mediante técnicas de electrocoagulación y EF, obteniendo un 97% de remoción de SST en el EF con las condiciones óptimas de densidad de corriente (65 mA/cm²), pH (2.0), tiempo (45 min), y dosis de H_2O_2 (0.06 g/L). Así mismo, las remociones de SST obtenidos en este estudio fueron del 91.24% a través de las condiciones óptimas de densidad de corriente (5.42 mA/cm²), tiempo (18 min), y dosis de H_2O_2 (111 ml/L). Se determina que los valores óptimos de densidad de corriente (65 mA/cm²) y tiempo de reacción (45 min), fueron superiores en los estudios realizados por Varank, et al., 2016, además de que los valores óptimos (0.06 g/L) para el H_2O_2 fueron inferiores en comparación con lo nuestro.

Por otra parte, para la remoción de la Turbidez los resultados fueron comparados con la de Luz et al., (2019, p. 5-7) quienes realizaron la eliminación de contaminantes de las aguas residuales en diferentes etapas del proceso de curtido por electrocoagulación, llegando a obtener un 100% de remoción en la Turbidez en condiciones de 28 mA/cm² de densidad de corriente, 60 min de tiempo de reacción y usando electrodos de Fe y Al. Así mismo, en este estudio se obtuvieron remociones de Turbidez hasta un 100% con valores de 5.42 mA/cm² de densidad de corriente, 10 min de tiempo de reacción y 55.5 ml/L de H_2O_2 . Por lo que se determina, que los procesos EF en comparación con otros autores se puede obtener los mismos resultados de remoción.

VI. CONCLUSIONES

La investigación “Tratamiento de Efluentes de la Industria de Curtiembre, etapa pelambre mediante Electro-Fenton” presenta las siguientes conclusiones:

1. para el diseño Taguchi la máxima remoción para el DQO fue del 87.77% en condiciones óptimas de 9.75 mA/cm², 18 min y 55.5 ml/L de H₂O₂, mientras que para el SST la remoción fue de 91.24% en condiciones óptimas de 5.42 mA/cm², 18 min y 111 ml/L de H₂O₂, por último, la remoción de la Turbidez fue de 100% en condiciones óptimas de 5.42 mA/cm², 10min y 55.5 ml/L de H₂O₂.
2. Para la remoción de DQO los factores densidad de corriente y tiempo de reacción fueron quienes más contribuyeron según el diseño Taguchi. Ya que según el ANOVA los valores p en la remoción de DQO son menores del 0.05 lo indico que el modelo fue significativo mientras que para las remociones de SST y Turbidez los modelos no se llegaron ajustar a los valores experimentales ya que los valores de p fueron superiores al 0.05, por lo que se determinó que los modelos no fueron estadísticamente significativos. Así mismo, la contribución de cada parámetro evaluado en la respuesta para la relación señal-ruido (*S/N*) fueron indicados a través de los valores Delta, los cuales según el rango de clasificación se podría determinar qué factores influían más en la remoción de DQO, SST y turbidez.
3. Para el diseño Taguchi los modelos presentados fueron obtenidos a partir de las ecuaciones 13-15, con valores R² ajustado de 95.16% para la DQO, 0.42% para el SST y 28.47% para la turbidez. Por lo que se determinó que el DQO fue significativo, mientras que el SST y la Turbidez no fueron significativos. En comparación con los modelos obtenidos en el DCC para la remoción de DQO, SST y Turbidez-los valores determinaron que no fueron significativos.

VII. RECOMENDACIONES

Con el objetivo de complementar y mejorar el tratamiento de las aguas residuales de las curtiembres (etapa pelambre) se prestan las siguientes recomendaciones para trabajos futuros:

1. Analizar la incorporación de un sistema adicional de tratamiento de EF tal como un sistema de aeración en donde se pueda tratar los contaminantes dificultosos y riesgosos tales como el cromo y sulfuro, con el objetivo de obtener un tratamiento mucho más completo.
2. Investigar y analizar la adición del oxígeno durante un proceso experimental EF, y determinar que tanto influye en la generación de H₂O₂ y si es necesario o no la adición de dicho componente.
3. Realizar un análisis de comparación sobre la cantidad de lodos generados al final del proceso experimental y ver la forma si puede ser reaprovechados.
4. Calcular el desgaste de los electros de Fe y Ru durante el proceso experimental e investigar que otros tipos de electros pueden usarse en combinación.
5. Calcular la cantidad de consumo de energía aplicados durante el proceso experimental.
6. Investigar y analizar qué efecto produciría la modificación del espacio entre los electrodos y determinar si beneficiaría o no en los procesos EF.

REFERENCIAS

1. Analog Devices. 2017. "Understanding How a Voltage Regulator Works." *Analog.com*: 1. <http://www.analog.com/en/technical-articles/how-voltage-regulator-works.html>.
2. Asghar, Raman, & Daud. 2014. "A Comparison of Central Composite Design and Taguchi Method for Optimizing Fenton Process." *Scientific World Journal*. 14.
3. Balladares, Oscar. "Tratamiento de Efluentes de Una Industria Textil Del Cantón Pelileo, Provincia Tungurahua, Contaminados Con Colorantes Azoicos Mediante Un Proceso Electro-Fenton." Proyecto (Ingeniero Químico). Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2014. 153 pp.
4. Bes, M, et al, 2018. "Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales." ISBN: 978-84-09-08637-5.
5. Casado, J. 2018. Towards industrial implementation of Electro-Fenton and derived technologies for wastewater treatment: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 7,102823.
6. Chiva, S., Guillermo, J., Martinez, R., & Climent, J. Procesos De Oxidación Avanzada En El Ciclo Integral Del Agua. Publicacions de la Universitat Jaume I. 2017. pp170. ISBN: 978-84-16546-30-5.
7. Córdova, Hansel et al. 2014. "Tratamiento De Las Aguas Residuales Del Proceso De Curtido Tradicional Y Alternativo Que Utiliza AComplejantes De Cromo." *Revista de la Sociedad Química del Perú* 80: 183–191.
8. Cruz-Rizo, A., Gutiérrez-Granados, S., Salazar, R., Peralta-Hernández, J. M. 2017. Application of electro-Fenton/BDD process for treating tannery wastewaters with industrial dyes. *Separation and Purification Technology*. 172, 296-302.
9. Deng., Y. & Englehardt, J., D. 2006. Treatment of landfill leachate by the Fenton process. *Water Research*. 40, 3683-3694.
10. Dixit, S., Yadav, A., Dwivedi, P. D., Das, D. 2015. Toxic hazards of leather industry and technologies to combat threat: a review. *Journal of Cleaner Production*. 87, 15, 39-49.
11. Espinoza, Oscar. Boletín De Vigilancia Tecnológica Cuero Y Calzado N°001-

- 2018 Evaluación Para La Sustitución De Procesos Y/O Productos Químicos Para La Producción Limpia En La Industria De Curtiembres. Dirección de Investigación, Desarrollo, Innovación y Transferencia Tecnológica. 2018. 32pp.
12. Esparza, Eliana. & Gamboa, Nadia. Contaminación Debida A La Industria Curtiembre. *Revista de Química*. Vol. XV. N° I, 2001.
 13. Elin Marlina & Purwanto. 2019. "Electro-Fenton for Industrial Wastewater Treatment: A Review." 125, 03003.
 14. Fukuda, Isa Martins et al. 2018. "Design of Experiments (DoE) Applied to Pharmaceutical and Analytical Quality by Design (QbD)." *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences* 54(Special Issue): 1–16.
 15. García Herrera. Procesos Fenton y Foto-Fenton para el tratamiento de aguas residuales de laboratorio microbiológico empleando Fe₂O₃ soportado en nanotubos de carbono. Tesis (Ingeniero Microbiólogo Industrial). Colombia: Pontificia Universidad Javeriana. 2014. 65 pp.
 16. Gómez, Sandra. Características Tecnológicas Del Cuero Napa De Ovino Adulto, Mediante Los Métodos De Curtido Wet-Blue Y Wet-White. Tesis (Ingeniero Zootecnista). Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina. 2016. 144 pp.
 17. Gómez Bastar, Sergio. "Metodología de la Investigación", Red Tercer Milenio, 2012. 92 pp. ISBN 978-607-733-149-0
 18. Guzmán & Luján. 2010 "Reducción de emisiones de la etapa de pelambre en el proceso de curtido de pieles," *Artículos Científicos* 4: 464-492.
 19. Hernández, R, et al, 2010. "Metodología de la Investigación." Interamericana Editores, S.A. de C.V. ISBN: 978-607-15-0291-9.
 20. Hernández, Méndez, Mendoza y Cuevas "Fundamentos de Investigación" McGRAW-HILL/Interamericana Editores, S. A. DE C. V. 2017. ISBN: 978-607-15-1395-3
 21. Henrique, Nivaldo, Espinoza, Ricieri, Daniele, and Rosângela Bergamasco. 2014. "Avaliação Da Remoção Dos Poluentes Do Efluente de Curtume Tratado Pelos Processos Eletro-Fenton e Foto-Fenton." *Revista Brasileira de Ciências Ambientais* : 44–53.

22. He Huanqi & Zhou Zhi. 2017. "Electro-Fenton process for water and wastewater Treatment." *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 1547-6537.
23. Huguenot, D., Mousset, E., Van Hullebusch, E. D. & Oturan, M. A. 2015. Combination of surfactant enhanced soil washing and electro-Fenton process for the treatment of soils contaminated by petroleum hydrocarbons. *Journal of Environmental Management* 153, 40–47.
24. Huamaní Taipe Gumercindo., la industria de la curtiembre y su incidencia en el medio ambiente de la ciudad de Lima – 2012. Tesis (Magister en Industrial). Universidad Nacional del Callao. 2014. 137 pp.
25. Iskander, S.M., Novak, J.T. & He, Z., 2019. Reduction of reagent requirements and sludge generation in Fenton's oxidation of landfill leachate by synergistically incorporating forward osmosis and humic acid recovery. *Water Res.* 151, 310e317.
26. José Orlando. 2017 "Response surface methodology for the optimization of an agricultural production," *Revista Ingeniería Industrial-Año 16 N°1*: 205-222, 2017, ISSN Online 0718-8307.
27. Krishnaiah & Shahabudeen. "Applied Design of Experiments and Taguchi Methods," 2012. 371 pp. ISBN-978-81-203-4527-0
28. Kurt Ugur, Omer Apaydin, and M. Talha Gonullu. 2007. "Reduction of COD in Wastewater from an Organized Tannery Industrial Region by Electro-Fenton Process." *Journal of Hazardous Materials* 143: 33–40.
29. Lagos Araujo, Lesly., K. Bioadsorción de cromo con borra de café en efluentes de una industria curtiembre local. Tesis (Licenciado en Química). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. 2016. 63 pp.
30. Ledezma Estrada, Adriana, Yu You Li, & Aimin Wang. 2012. "Biodegradability Enhancement of Wastewater Containing Cefalexin by Means of the Electro-Fenton Oxidation Process." *Journal of Hazardous Materials* 227–228: 41–48.
31. Leyva Cruz, Milagos., C. Reducción del DQO y SST de los Efluentes residuales de una industria azucarera en Paramonga, mediante el uso de Micro -Nanoburbujas de Aire. Tesis (Ingeniero Ambiental). Lima-Perú: Universidad Cesar Vallejo. 2017. 99 pp.

32. Li, Mo et al, 2015 “Treatment of amoxicillin by O₃/Fenton process in a rotating packed bed.” *Journal of Environmental Management*. 150: 404-441.
33. Liang, Liang et al. 2016. “Preparation of Transition Metal Composite Graphite Felt Cathode for Efficient Heterogeneous Electro-Fenton Process.” *Environmental Science and Pollution Research* 24: 1122–32.
34. Límites Máximos Permisibles y Valores Referenciales para las actividades industriales de cemento, cerveza, curtiembre y papel. Decreto Supremo N° 003-2002-PRODUCE-Lima. 2002.
35. Lin, Sheng H., and Cho C. Lo. 1997. “Fenton Process for Treatment of Desizing Wastewater.” *Water Research* 31(8): 2050–56.
36. Liu Haijin, et al, 2019. “Synchronous detoxification and reduction treatment of tannery sludge using Cr (VI) resistant bacterial strains.” *Science of the Total Environment*. 687: 34-40.
37. De La Luz-Pedro, Alejandra et al. 2019. “Pollutant Removal from Wastewater at Different Stages of the Tanning Process by Electrocoagulation.” *Journal of Chemistry*:1-10.
38. Manual de usuario 2013. HACH. DR 90. LANGE DOC022.98.80344.
39. Marin Jara, E., & Gonzales Aredo, F., A. Influencia de la Concentración de H₂O₂ Y Densidad de Corriente en la Remoción de color Y DQO de la Vinaza Mediante Electro-Fenton. Trabajo de Investigación (Ingeniero Ambiental). Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo – Perú. 2018, P. 77 pp.
40. Meijide, J., Rodríguez, S., Angeles, M. S. & Pazos. M. 2018. Comprehensive solution for acetamiprid degradation: Combined electro-Fenton and adsorption process. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 808, 446-454.
41. Mousset, E., Wang, Z. & Lefebvre, O. 2016. Electro-Fenton for control and removal of micropollutants – process optimization and energy efficiency. *Water Science and Technology*. 74 (9), 2068-2074.
42. Moradi Mahsa & Moussavi Gholamreza. 2019. “Enhanced treatment of tannery wastewater using the electrocoagulation process combined with UVC/VUV photoreactor: Parametric and mechanistic evaluation.” *Chemical Engineering Journal*. 358: 1038-1046.
43. Monteil, Hélène. 2018. “A review on Efficiency and Cost Effectiveness of Electro- and Bio-electro-Fenton processes: Application to the Treatment of

- Pharmaceutical Pollutants in Water.” *Chemical engineering journal*. 18: 31428-1.
44. Nidheesh, P., V. & Gandhimathi, R. 2012. Trends in electro-Fenton process for water and wastewater treatment: An overview. *Desalination*. 299,1-15.
45. Obregón Castillo, Luis., R. Estudio de degradación electroquímica de residuos lácteos usando electrodos a base de fieltro gráfico. Tesis (Magíster en Química). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. 2016. 57 pp.
46. Oturan, Nihal, Minghua Zhou, and Mehmet A. Oturan. 2010. “Metomyl Degradation by Electro-Fenton and Electro-Fenton-like Processes: A Kinetics Study of the Effect of the Nature and Concentration of Some Transition Metal Ions as Catalyst.” *Journal of Physical Chemistry A* 114: 10605–11.
47. El Bioquímico, Søren Peter Lauritz Sørensen. 1909. Estudios sobre acidimetría. EL PAÍS, 29 MAY 2018 [Fecha de consulta: 10 de enero de 2020]. Disponible en: https://elpais.com/elpais/2018/05/29/ciencia/1527575227_169068.html
48. Pablo Morcelle del Valle. 2010. “Instrumentos y Mediciones.” : 1–9.
49. Panizza, Marco, & Giacomo Cerisola. 2009. “Direct and Mediated Anodic Oxidation of Organic Pollutants.” *Chemical Reviews* 109: 6541–69.
50. Paramo-Vargas, J., Camargo, A, M, E., Gutiérrez-Granados, S., Godinez, L, A. & Peralta-Hernández, J, M. 2015. Applying electro-Fenton process as an alternative to a slaughterhouse effluent treatment. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 754, 80-86.
51. Portada Mamani., A. Tratamiento de las aguas residuales del proceso de curtido en pieles por procesos físico-químico de la curtiembre de la facultad de ingeniería química de la una-puno. Tesis (Ingeniero Químico). Puno: Universidad Nacional del Altiplano Puno–Perú 2016. 111 pp.
52. Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales. Resolución ministerial N° 273-2013-VIVIENDA.
53. Qiu, S., He, D., Ma, J., Liu, T., & Waite, T. D. (2015). *Kinetic Modeling of the Electro-Fenton Process: Quantification of Reactive Oxygen Species Generation. Electrochimica Acta*, 176, 51–58.

- 54.** Radwan, M., Alalm, MM G. & El-Etriby, H, K. 2019. Application of electro-Fenton process for treatment of water contaminated with benzene, toluene, and p-xylene (BTX) using affordable electrodes. *Journal of Water Process Engineering*. 31, 100837.
- 55.** Rabbani, D., M. R. Rezaeimofrad, A. Mazaheri, and M. Mosayebi. 2015. "Efficiency of Electrochemical, Fenton and Electro-Fenton Processes on COD and TSS Removal from Leachate." *Journal of Environmental Science and Technology* 8(5): 207–15.
- 56.** Rahmani, A., Hossieni, E. & Poormohammadi, A. 2015. Removal of Chromium (VI) from Aqueous Solution Using Electro-Fenton Process. *Environ. Process*. 2, 419–428.
- 57.** Ramírez, Susana et al. 2019. "Investigation of Pilot-Scale Constructed Wetlands Treating Simulated Pre-Treated Tannery Wastewater under Tropical Climate." *Chemosphere* 234: 496–504.
- 58.** Shahheidar, Narjes et al. 2018. "Enhancement the Conditioning of Waste Activated Sludge through a Sequence of Freeze/Thaw-Electro-Fenton Process." *Polish Journal of Chemical Technology* 20(1): 47–53.
- 59.** Sánchez Mejía, David., P. Gestión de riesgo de desastres de las lagunas de oxidación de covicorti, el cortijo y propuesta para tratamiento de aguas residuales industriales de curtiembres en la ciudad de Trujillo y distritos. La libertad. Tesis (Ingeniero Civil). Trujillo: Universidad Privada Antenor Orrego. 2018. 142 pp.
- 60.** Sánchez R., C. 2015. Reacciones Fenton. Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil. (FT-TER-003).
- 61.** Sankara Narayanan, T. S.N., G. Magesh, & N. Rajendran. 2003. "Degradation of O-Chlorophenol from Aqueous Solution by Electro-Fenton Process." *Fresenius Environmental Bulletin* 12: 776–780.
- 62.** Selvaraj, et al, 2019. "Removal of sulfide and recycling of recovered product from tannery lime wastewater using photoassisted-electrochemical oxidation process." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*.18: 31287-5.
- 63.** Sultana, S., Choudhury, M, R., Bakr, A, R., Anwar, N. & Rahaman, MD, S. 2018. Effectiveness of electro-oxidation and electro-Fenton processes in

- removal of organic matter from high-strength brewery wastewater. *Journal of Applied Electrochemistry*. 48, 519–528.
64. Song, Z, et al, 2004. "Treatment of tannery wastewater by chemical coagulation." 164: 249-259.
 65. T. J. S. Anand et al. 2010 "DOE based statistical approaches in modeling of laser processing-review and suggestion," *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS* 10: 1–8.
 66. Tezcan, U., Topal, S., Oduncu, E. & Ogutveren, U. B. 2015. Treatment of Tissue Paper Wastewater: Application of Electro-Fenton Method. *International Journal of Environmental Science and Development*. 6, 628.
 67. Verma, M. & Haritash, A.K., 2019. Degradation of amoxicillin by Fenton and Fentonintegrated hybrid oxidation processes. *J. Environ. Chem. Eng.* 7, 102886.
 68. Varank, G., Guvenc, S, Y., Gurbuz, G. & Engin, G, O. 2016. Statistical optimization of process parameters for tannery wastewater treatment by electrocoagulation and electro-Fenton techniques. *Desalination and Water Treatment*. 57, 53.
 69. Venkatadri, Rajagopalan, & Robert W Peters. 1993. "Chemical oxidation technologies: Ultraviolet light/hydrogen peroxide, Fenton's reagent, and titanium dioxide-assisted photocatalysis." *Hazardous Waste and Hazardous Materials* 10: 2.
 70. Wang, CT., Chou, WL., Chung, MH., Kuo, YM. 2010. COD removal from real dyeing wastewater by electro-Fenton technology using an activated carbon fiber cathode. *Desalination*. 253: 129-134.
 71. Zhang, Meng hui et al. 2019. "A Review on Fenton Process for Organic Wastewater Treatment Based on Optimization Perspective." *Science of the Total Environment*. 670: 110–21.
 72. Zhang, H., Fei, C., Zhang, D., Tang, F. 2007. Degradation of 4-nitrophenol in aqueous medium by electro-Fenton method. *Journal of Hazardous Materials*. 145, 227-232.
 73. Ziati, M, O CHERIFI, and Z YAHIA. 2018. "Removal of Chemical Oxygen Demand From Tannery Wastewater B Y Fenton ' S Reagent." *Larhyss Journal*: 111–21.
 74. Zumbado H. 2004. Analisis quimicos de los alimentos métodos clásicos.

ANEXO N° 01

Tabla N° 13. Límite máximo permisible para la industria de curtiembre, Decreto Supremo N° 003 – 2002 – PRODUCE.

PARÁMETROS	Límites Máximos Permisibles de Efluentes	
	Para Alcantarillado	Para aguas Superficiales
pH	6.5 – 9.5	5.0 – 8.5
Temperatura (°C)	35	35
Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	1000	50
Aceites y Grasas (mg/l)	100	25
DBO ₅ (mg/l)	1000	50
DQO (mg/l)	2500	250
Sulfuros (gm/l)	10	1
Cromo VI (gm/L)	0.5	0.3
Cromo Total (gm/l)	5	2.5
N-NH ₄ (mg/l)	50	20

Fuente: Decreto Supremo. N° 003-2002-PRODUCE.

ANEXO N° 02

Tabla N° 14. Operacionalización de variable.

Variable		Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidades
INDEPENDIENTE	PROCESO ELECTRO-FENTON	La generación de H ₂ O ₂ y la regeneración de Fe ²⁺ mediante Fe ³⁺ a través del uso de dos electrodos interconectados en un reactivo, aplicando corriente eléctrica de una fuente hace al termino conceptual del proceso Electro-Fenton. (Obregón, 2016, p. 9).	Para evaluar el tratamiento del proceso Electro-Fenton se aplicará mediante la Densidad de corriente y tipos de Electroodos.	Electro-Fenton	Densidad de corriente	(mA/cm ²)
					Tiempo de reacción	(min)
					Dosis de H ₂ O ₂	(mg/L)
					Tipo de Electroodos	Hierro (Fe) Rutenio (Ru)
DEPENDIENTE	TRATAMIENTO DEL EFLUENTE DE CURTIEMBRE (ETAPA DE PELAMBRE)	Se tiene en cuenta que la mayor alteración de los efluentes industriales se da en los parámetros de SST y DQO, siendo estos los primordiales parámetros de evaluación de la calidad de agua. (Leyva Cruz, 2017, p. 2).	El efluente tratado de etapa de pelambre se evaluará mediante las propiedades Físicas y Químicas.	Propiedades Físicas	Turbidez	(NTU)
					Conductividad Eléctrica	(μS/cm)
					Concentración de SST	(mg/l)
				Propiedades Químicas	pH	
					Concentración de DQO	(mg O ₂ /l)

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO N° 03

Tabla N° 15. Instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad.

Instrumento	Validez	Confiabilidad
pH-metro Marca (HANNA). Modelo (HI8424).	El pH-metro es usado para medir a nivel acidez y alcalinidad de una solución (Sørensen, 1909, p. 1).	El equipo será calibrado cada 10 mediciones, a fin de garantizar la confiabilidad
Colorímetro portátil Marca (HACH). Modelo (DR/890).	El DR 890 es un colorímetro portátil. El instrumento se usa para medir los parámetros del agua, el agua residual y las aplicaciones industriales (HACH, 2013, p. 36), el parámetro que se ha medido fue DQO.	
Balanza analítica (0.0001 g) Marca SARTORIUS Modelo QUINTIX224-1S	Es un instrumento que permite conocer la exactitud: la masa de matriz destinada al análisis, la masa de sustancias para preparar soluciones de concentración exacta (Zumbado H, 2004, p. 80).	
Fuente Voltaje Regulador (INPUT 220 VAC 3-6 AMP MODE).	Es un instrumento que se usa para regular el voltaje, voltaje de salida fijo de una magnitud preestablecida que permanece constante independientemente de los cambios en su voltaje de entrada o condiciones de carga (Analog Devices, 2009, p. 1).	
Amperímetro Analógico Medidor DC 0-15 A 44C2	Es un instrumento que se usa para efectuar la medición de la corriente y de la tensión a través de la resistencia incógnita mediante el uso de un amperímetro analógico (Morcelle, p. 7).	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 16. Voltaje y amperio usado en mA/cm², en el proceso experimental Electro-Fenton. Considerando un área de 36.9 cm².

Voltaje	Amperio	mA/cm ²
1.5	0.14	3.79
2	0.20	5.42
2.5	0.28	7.58
2.9	0.36	9.75
3.5	0.44	11.92

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO N° 04

Tabla N° 17. Resultados del ANOVA para el modelo cuadrático de la superficie de respuesta para la eliminación de la DQO por el proceso de electro-Fenton.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	186.30	3	62.10	2.02	0.15
A: Densidad de Corriente	56.76	1	56.76	1.50	0.25
B: Tiempo de Reacción	89.79	1	89.79	2.38	0.16
C: Dosis H ₂ O ₂	9.17	1	9.17	0.24	0.63
AA	19.10	1	19.10	0.51	0.49
AB	59.05	1	59.05	1.56	0.24
AC	5.59	1	5.59	0.15	0.71
BB	41.75	1	41.75	1.10	0.32
BC	11.78	1	11.78	0.31	0.59
CC	0.44	1	0.44	0.01	0.91
Error total	302.30	8	37.78		
Total (corr.)	617.37	17			

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 15.21%

Tabla N° 18. Resultados del ANOVA para el modelo cuadrático de la superficie de respuesta para la eliminación de la SST por el proceso de electro-Fenton.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	3.48	3	1.16	1.17	0.35
A: Densidad de Corriente	259.33	1	259.33	2.84	0.13
B: Tiempo de Reacción	3.01	1	3.01	0.03	0.86
C: Dosis H ₂ O ₂	3.19	1	3.19	0.03	0.85
AA	315.40	1	315.40	3.45	0.10
AB	7.51	1	7.51	0.08	0.78
AC	0.16	1	0.16	0.00	0.96
BB	10.47	1	10.47	0.11	0.74
BC	2.17	1	2.17	0.02	0.88
CC	0.99	1	0.99	0.01	0.91
Error total	731.14	8	91.39		
Total (corr.)	1283.58	17			

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 2.89%

Tabla N° 19. Resultados del ANOVA para el modelo cuadrático de la superficie de respuesta para la eliminación de la Turbidez por el proceso de electro-Fenton.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	121.33	3	40.44	0.49	0.69
A: Densidad de Corriente	259.33	1	259.33	2.84	0.13
B: Tiempo de Reacción	3.01	1	3.01	0.03	0.86
C: Dosis H ₂ O ₂	3.19	1	3.19	0.03	0.85
AA	315.40	1	315.40	3.45	0.10
AB	7.51	1	7.51	0.08	0.78
AC	0.16	1	0.16	0.00	0.96
BB	10.47	1	10.47	0.11	0.74
BC	2.17	1	2.17	0.02	0.88
CC	0.99	1	0.99	0.01	0.91
Error total	731.14	8	91.39		
Total (corr.)	1283.58	17			

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 0.00 %

ANEXO N° 05

Tabla N° 20. Diseño Taguchi, niveles de tres factores y resultados experimentales obtenidos, mediante la optimización del Electro-Fenton.

FACTORES				RESPUESTA					
Corridas	Densidad de Corriente	Tiempo (min)	H ₂ O ₂ (mg/L)	Valores Actuales			Relación S/N		
				(%) Remoción de DQO	(%) Remoción de SST	(%) Remoción de Turbidez	(%) Relación S/N de DQO	(%) Relación S/N de SST	(%) Relación S/N de Turbidez
1	5.42	10	55.5	54.82	96.13	97.68	34.77	39.65	39.79
2	5.42	14	111	57.83	97.77	92.70	35.24	39.80	39.34
3	5.42	18	166.5	61.48	97.94	92.91	35.77	39.81	39.36
4	7.58	10	111	52.45	97.67	98.96	34.39	39.79	39.90
5	7.58	14	166.5	57.83	96.26	68.79	35.24	39.66	36.75
6	7.58	18	55.5	61.05	96.36	82.80	35.71	39.67	38.36
7	9.75	10	166.5	55.68	96.94	98.19	34.91	39.73	39.84
8	9.75	14	55.5	59.76	96.94	92.94	35.52	39.73	39.36
9	9.75	18	111	64.92	96.89	79.78	36.24	39.72	38.03

Fuente: Elaboración propia.

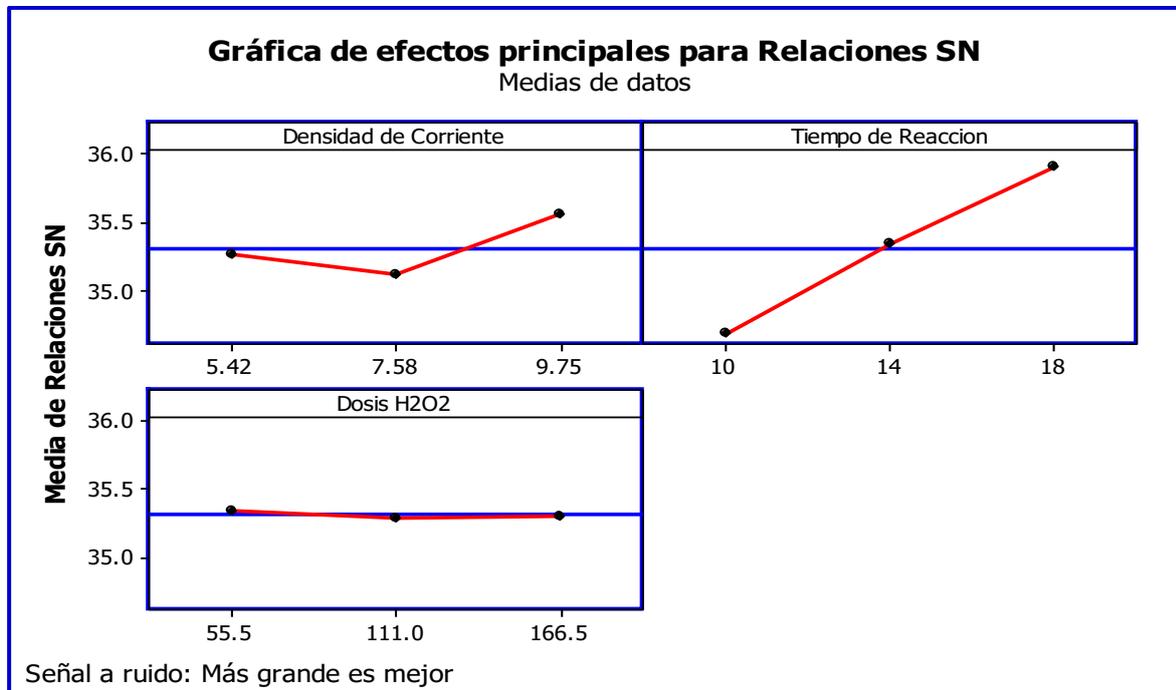
ANEXO N° 06

Tabla 21. Resultados del ANOVA para el Taguchi.

Factores	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F Valor	P Valor	% de Contribución
% DQO						
Densidad de Corriente	2	14.24	7.12	10.05	0.02	12.16
Tiempo de Reacción	2	100.05	50.02	70.60	0.00	85.42
Dosis H ₂ O ₂	2	0.07	0.03	0.03	0.97	0.06
% SST						
Densidad de Corriente	2	0.41	0.20	0.46	0.66	11.48
Tiempo de Reacción	2	0.03	0.01	0.02	0.98	0.92
Dosis de H ₂ O ₂	2	1.41	0.70	1.56	0.31	38.73
% Turbidez						
Densidad de Corriente	2	182.2	91.09	1.22	0.38	21.85
Tiempo de Reacción	2	353.2	176.72	2.37	0.20	42.39
Dosis H ₂ O ₂	2	35.60	17.80	0.14	0.88	4.27

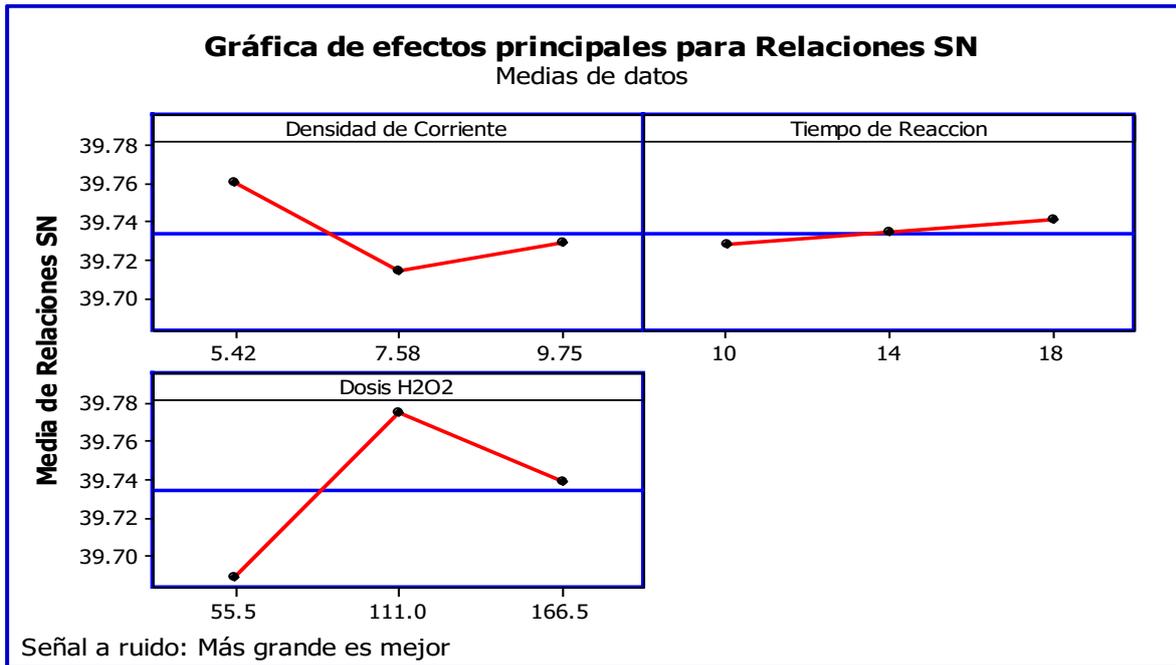
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 9. Relación media *S/N* para eliminación de la DQO.



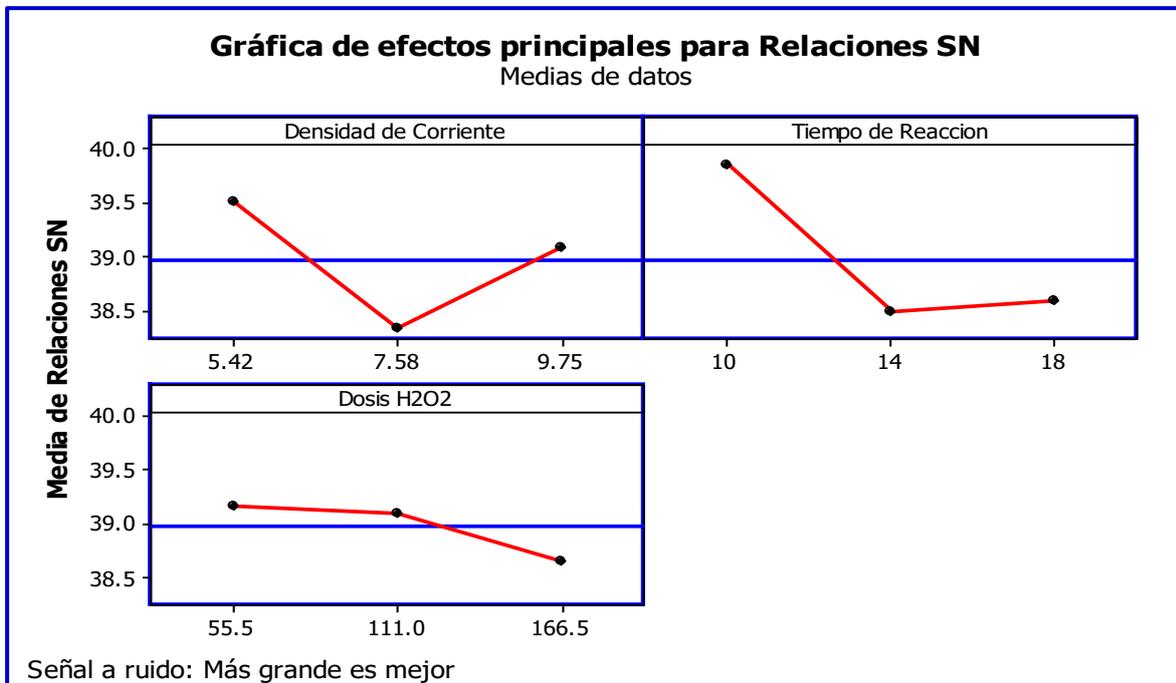
Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 10. Relación media S/N para eliminación del SST.



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 11. Relación media S/N para eliminación de Turbidez.



Fuente: Elaboración propia.

ANEXO N° 07



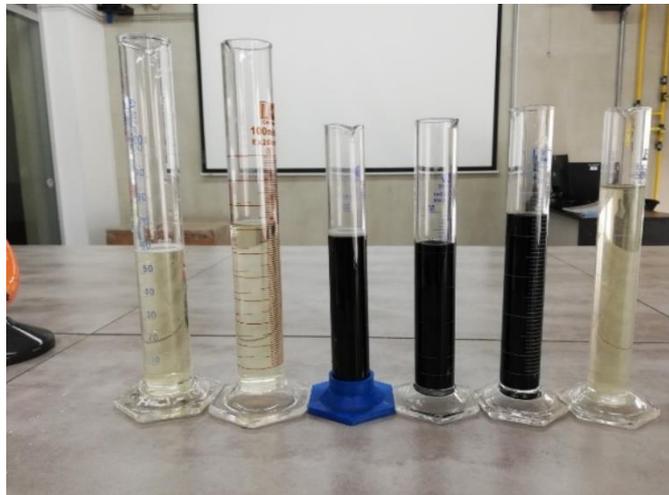
INICIO DEL PROCESO EXPERIMENTAL ELECTRO-FENTON



OXIDACION DEL EFLUENTE, ETAPA PELAMBRE



SEDIMENTACION DE LAS MUESTRAS TRATADAS



**MUESTRAS TRADADAS DE LAS CORRIDAS
EXPERIMENTALES**



DETERMINACION DEL DQO