ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.895

Xylene and Toluene Removal from Wastewater in Petrochemical Storage Terminals: Application of the Fenton Process

Victor Pretell, Dr[1], Denisse Livia, Ing[1], María Viera-Palacios, MSc[1]
[1]Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, *vpretellh@uni.edu.pe*, *dliviag@uni.edu, mviera@uni.edu.pe*

Abstract*– The Fenton process was applied to treat wastewater from storage terminals of petrochemical products contaminated with xylene and toluene. The Fenton process is an advanced oxidation technology that involves the addition of H_2O_2 and Fe(II) to generate hydroxyl radicals, which degrade the contaminants. The wastewater was characterized, and tests were conducted by varying the molar ratio of the Fenton reagents (H_2O_2/Fe^{2+}) in an acidic medium (pH 3.5), with a contact time of 45 minutes, to determine the optimal dosage. The efficiency of organic matter removal was evaluated by measuring the Chemical Oxygen Demand (COD) and the Biochemical Oxygen Demand (BOD_5). High removal efficiencies for COD and BOD_5 were achieved, reaching 92.44% and 93.15%, respectively, at the experimental scale, and 89.49% and 88.52% at the industrial scale. It was determined that a molar ratio of H_2O_2/Fe^{2+} of 31.3 was optimal at the experimental scale. It can be concluded that the Fenton process is effective for treating this type of wastewater, achieving compliance with the maximum permissible limits (MPL) established by Peruvian legislation.

Keywords*-- Fenton, BTX, COD, Hydroxyl radical.

Remoción de Xileno y Tolueno en Agua Residual de Terminales de Almacenamiento de Productos Petroquímicos: Aplicación del Proceso Fenton

Victor Pretell, Dr[1], Denisse Livia, Ing[1], María Viera-Palacios, MSc[1]
[1]Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, *vpretellh@uni.edu.pe*, *dliviag@uni.edu*, *mviera@uni.edu.pe*

Resumen*– Se aplicó el proceso Fenton para tratar aguas residuales de terminales de almacenamiento de productos petroquímicos contaminados con xileno y tolueno. El proceso Fenton es una tecnología de oxidación avanzada que consiste en añadir H_2O_2 y Fe(II) para generar radicales, hidroxilo que degradan los contaminantes. Se caracterizó el agua residual y luego se hicieron pruebas variando la relación molar de los reactivos Fenton (H_2O_2/Fe^{2+}) en un medio ácido (pH 3.5), tiempo de contacto de 45 minutos para hallar la dosis adecuada. Se evaluó la eficiencia de remoción de la materia orgánica midiendo la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5). Se logró una alta eficiencia de remoción de DQO y DBO5, alcanzando el 92.44% y 93.15% respectivamente en la escala experimental y 89.49% y 88.52% en la escala industrial. Se determinó que una relación molar H_2O_2/Fe^{2+} de 31.3 era la adecuada en la escala experimental. Podemos concluir que el proceso Fenton es efectivo para tratar estas aguas residuales, logrando cumplir con los límites máximos permisibles (LMP) establecidos por la legislación peruana.

Palabras clave*— Fenton, BTX, DQO, Radical hidroxilo.

I. Introducción

Las aguas residuales producidas por la industria petroquímica representan un desafío ambiental significativo por su composición compleja, que frecuentemente incluye compuestos aromáticos como xileno, tolueno, benceno, etilbenceno y naftaleno, entre otros.

El xileno y el tolueno son hidrocarburos aromáticos que, al ser liberados en los cuerpos de agua, pueden tener efectos tóxicos relevantes. Ambos compuestos son solubles en agua y pueden bioacumularse en organismos acuáticos, afectando su salud y a la cadena alimentaria. La exposición al xileno puede causar efectos adversos en el sistema nervioso central, hígado y riñones de los organismos acuáticos [1]. El tolueno, por su parte, es conocido por su toxicidad aguda y crónica, afectando la reproducción y el desarrollo de peces y otros organismos acuáticos [2].

Estos compuestos, conocidos por su toxicidad y persistencia en el medioambiente, son difíciles de eliminar mediante los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales [2], [3]. La presencia de xileno y tolueno, en particular, plantea una seria amenaza para los ecosistemas acuáticos y la salud humana debido a sus efectos carcinogénicos, mutagénicos y teratogénicos [3].

El proceso de descarga de productos químicos desde buques tanque hasta un terminal de almacenamiento de productos químicos consiste en la transferencia del producto desde el buque hacia los tanques de almacenamiento en tierra, utilizando mangueras submarinas y un sistema de bombeo. El proceso se divide en tres etapas: a) Recepción del corte inicial del producto o cabeza. Inicialmente, el ducto submarino se encuentra lleno de agua. Antes de iniciar la descarga, se efectúa un desplazamiento con nitrógeno desde el buque hacia el terminal, para crear una barrera entre el agua y el producto químico a descargar. El personal del buque empieza el bombeo del producto hacia el terminal. Se monitorea la densidad de la mezcla que llega al terminal. Cuando la densidad coincide con la del producto, se abre la válvula del tanque de almacenamiento y arranca la descarga principal. La mezcla inicial de agua, nitrógeno y restos del producto previo, llamada "cabeza"; se envía a la poza de decantación; b) Descarga del producto desde el buque hacia los tanques de almacenamiento en tierra, bajo la supervisión del personal del terminal. Se realizan mediciones periódicas con el propósito de supervisar el volumen de descarga; c) Corte final del producto o cola. Al finalizar la descarga del producto, se efectúa un desplazamiento con nitrógeno para desviar el producto residual en las mangueras hacia los tanques de almacenamiento. Este proceso genera una mezcla de agua, nitrógeno y restos del producto, llamada "cola", que se envía a la poza de decantación para su posterior tratamiento [4], [5].

En Perú, el Decreto Supremo Nro. 037-2008-PCM [6] establece los Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes líquidos (agua residual), fijando un límite de 50 mg/L para la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y de 250 mg/L para la Demanda Química de Oxígeno (DQO) para las descargas hacia cuerpos receptores. Estos límites aplican a las descargas de las pozas de decantación, pozas separadoras y pozas API de los terminales de almacenamiento de productos químicos.

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) son parámetros cruciales para evaluar la calidad del agua, midiendo la cantidad de oxígeno requerida para la degradación de sustancias orgánicas [7]. La DBO mide la cantidad de oxígeno consumido por los microorganismos al descomponer la materia orgánica biodegradable en un período específico (típicamente 5 días a 20 °C), lo que refleja la carga orgánica biodegradable del agua [7]. Por otro lado, la DQO mide la cantidad total de oxígeno requerida para oxidar químicamente toda la materia orgánica (tanto biodegradable como no biodegradable) presente en el agua, utilizando un agente

oxidante fuerte en condiciones ácidas y altas temperaturas [7]. La DQO generalmente tiene valores más altos que la DBO, ya que incluye la oxidación de materia orgánica no biodegradable que los microorganismos no pueden descomponer [7]. Estos parámetros son esenciales para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales [7]. El valor de la DQO es un parámetro crucial para evaluar la eficacia del proceso de Fenton, donde se busca reducir este valor [7], [8]. La DBO y la DQO se miden comúnmente para evaluar la contaminación del agua [7], [8]. La reducción de estos parámetros indica la eficiencia de los tratamientos implementados [7], [8], [9].

A. Tecnologías de Oxidación Avanzada (PAO)

Las Tecnologías de Oxidación Avanzada (PAO) son un conjunto de procesos fisicoquímicos diseñados para la eliminación de contaminantes, principalmente orgánicos, presentes en las aguas residuales [8]. Estos procesos se caracterizan por la generación in situ de especies químicas transitorias con un alto poder oxidante, siendo el radical hidroxilo (•OH) el más relevante [8]. A diferencia de los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales, que a menudo se centran en la separación o la transferencia de fase de los contaminantes, las PAO transforman químicamente estos compuestos, frecuentemente hasta su completa mineralización en sustancias menos nocivas, como dióxido de carbono y agua [8].

Las PAO son especialmente útiles en el tratamiento de contaminantes refractarios y no biodegradables que resisten los tratamientos biológicos convencionales [8]. Estos incluyen una amplia gama de compuestos, como productos farmacéuticos, pesticidas, productos químicos industriales, y compuestos orgánicos persistentes presentes en aguas residuales de diversas industrias como la petroquímica, textil, y farmacéutica [8]. La capacidad de las PAO para degradar estos contaminantes complejos y persistentes las convierte en una herramienta valiosa para la protección del medioambiente y la salud humana [8].

La generación de radicales hidroxilos (•OH) es el núcleo de las PAO. Existen diferentes métodos para lograrlo, los cuales dan lugar a las distintas tecnologías de oxidación avanzada:

1) Proceso Fenton: Este método es uno de los más estudiados y empleados debido a su simplicidad y bajo costo [8]. Este proceso se basa en la reacción entre peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y un catalizador de hierro ferroso (Fe^{2+}) para la generación de radicales hidroxilos [8] en medio ácido. La reacción principal que origina los radicales hidroxilos es:

$$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + \bullet OH + OH^- \quad (1)$$

El radical hidroxilo es capaz de oxidar una amplia gama de compuestos orgánicos, incluyendo los presentes en aguas oleosas. El hierro férrico (Fe^{3+}) puede regenerarse a hierro ferroso (Fe^{2+}) mediante diferentes mecanismos, como la reducción con peróxido de hidrógeno (mostrada en "2") o mediante la adición de radiación UV (proceso foto-Fenton) [7].

$$Fe^{3+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{2+} + \bullet OOH + H^+ \quad (2)$$

Las condiciones típicas para el proceso Fenton convencional requieren de un pH ácido, generalmente entre 2 y 4, lo cual puede ser una limitación; sin embargo, existen variantes optimizadas para operar a un rango de pH más amplio [10], [11], [12]. La temperatura puede variar, pero muchos estudios se realizan a temperatura ambiente, aunque se ha observado que temperaturas elevadas pueden mejorar la cinética de la reacción. La dosificación de los reactivos (H_2O_2 y Fe^{2+}) depende de la concentración de la carga orgánica presente en el agua residual, medida a través de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Algunos estudios reportan relaciones molares de Fe^{2+}/H_2O_2 que varían desde 1:1 hasta 1:60 [7], [13], [14]. La selección de las condiciones adecuadas dependerá de las características específicas del agua residual a tratar, incluyendo su composición, concentración de contaminantes, y el objetivo de la calidad del agua tratada.

2) Proceso Foto-Fenton: El proceso foto-Fenton, que combina el proceso Fenton con radiación UV o solar, puede aumentar la eficiencia de la degradación y reducir la cantidad de catalizador necesario, dado que la luz favorece la regeneración del Fe^{2+} y la formación de radicales •OH [10], [15]. Este proceso puede ser usado en combinación con otros tratamientos [8].

3) Proceso Electro-Fenton: En este proceso, el peróxido de hidrógeno se genera in situ mediante electrólisis, lo que elimina la necesidad de añadir este reactivo externamente [10]. Además, se puede lograr la regeneración continua del catalizador Fe^{2+} en el cátodo [10]. El electro-Fenton también puede combinarse con la luz para mejorar la eficiencia (proceso foto-electro-Fenton) [10]. Este método puede utilizar diferentes materiales para mejorar su rendimiento [8], [10], [16].

4) Fotocatálisis: En este proceso, un catalizador semiconductor, típicamente dióxido de titanio (TiO_2), se activa por la radiación UV, generando pares de electrones-hueco (e^-/h^+) que, a su vez, producen radicales hidroxilos y otras especies oxidantes [12]. Este método puede ser usado para degradar diferentes contaminantes. [12]. Algunos estudios han evaluado el uso de materiales combinados, o con elementos dopantes, para mejorar su rendimiento [8], [12].

5) Ozonización: El ozono (O_3) es un agente oxidante que puede degradar compuestos orgánicos directamente o mediante la generación de radicales hidroxilos durante su descomposición [12]. La ozonización es más eficiente en medios alcalinos y puede combinarse con otros procesos como el peróxido de hidrógeno o la radiación UV [12].

6) Radiación UV: La radiación ultravioleta (UV) se utiliza para generar radicales hidroxilos a partir de peróxido de hidrógeno (UV/H_2O_2) o para descomponer directamente ciertos contaminantes (fotólisis) [12]. La radiación UV puede combinarse con ozono (UV/O_3) para aumentar la producción de radicales hidroxilos [12].

7) Otros Métodos: Otras PAO incluyen el uso de ultrasonido (US) [12], la radiólisis gamma o el uso de hierro cero-valente [17].

Las PAO ofrecen múltiples beneficios en comparación con los tratamientos convencionales, entre ellos:

1) Alta Eficiencia de Degradación: Los radicales hidroxilos (•OH) generados por las PAO son altamente reactivos y pueden oxidar y degradar una amplia variedad de contaminantes orgánicos, incluidos aquellos que son difíciles de tratar con otros métodos [8].

2) Mineralización de Contaminantes: Las PAO pueden convertir los contaminantes orgánicos en productos finales menos dañinos, llegando incluso a dióxido de carbono y agua, lo que reduce significativamente su impacto ambiental [8].

3) Reducción de la Toxicidad: Las PAO pueden reducir la toxicidad de las aguas residuales tratadas [8].

4) Versatilidad: Las PAO pueden adaptarse a una variedad de aguas residuales con diferentes composiciones y niveles de contaminación, así como a diferentes escalas, desde laboratorio hasta aplicaciones industriales [8].

5) Pretratamiento Efectivo: Las PAO pueden utilizarse como pretratamiento para hacer los efluentes más biodegradables y menos tóxicos, lo que facilita su posterior tratamiento biológico [8].

Sin embargo, las PAO también presentan algunas limitaciones:

1) Costo: Algunas PAO, especialmente aquellas que requieren altos consumos de energía o reactivos costosos, pueden tener un costo elevado [8], [18]. Sin embargo, muchos estudios se han centrado en mejorar los catalizadores y las condiciones de operación para reducir los costos [8], [12], [16].

2) Formación de Subproductos: Algunas PAO pueden generar subproductos tóxicos durante la degradación de contaminantes, aunque esto puede ser controlado con la optimización de las condiciones de operación [8], [10], [12].

3) Sensibilidad a las Condiciones Operativas: El rendimiento de las PAO puede verse afectado por factores como el pH, la temperatura, la concentración de reactivos y la presencia de otros compuestos en el agua residual [8], [12].

En resumen, las tecnologías de oxidación avanzada son una herramienta poderosa y versátil para el tratamiento de aguas residuales complejas, particularmente aquellas que contienen contaminantes orgánicos persistentes o no biodegradables [8]. La selección de la PAO más adecuada dependerá de factores como la naturaleza de los contaminantes, la escala del tratamiento, el costo y la eficiencia deseada [8]. La combinación de las PAO con otros procesos de tratamiento también puede ser una estrategia efectiva para lograr una remoción óptima de contaminantes, y para mejorar la biodegradabilidad del efluente [8].

Ante la problemática del tratamiento del agua residual que contiene xileno y tolueno, los Procesos Avanzados de Oxidación (PAO), y específicamente el proceso Fenton, se constituyen en una alternativa para el tratamiento de estas aguas residuales.

Esta investigación tiene como objetivo la remoción del xileno y tolueno en las aguas residuales provenientes de los terminales de almacenamiento de productos petroquímicos aplicando el proceso Fenton para cumplir con las regulaciones ambientales peruanas para descargar el agua tratada al cuerpo receptor. Se trabajará con agua residual real proveniente de una planta de almacenamiento de xileno y tolueno. Se analizarán las condiciones de operación en el proceso Fenton para maximizar la eficiencia de remoción de estos compuestos orgánicos.

II. Materiales y Métodos

A. Materiales

1) Agua Residual: Se tomaron seis litros de agua residual de la Poza de Residuos Líquidos del sistema de tratamiento de efluentes líquidos provenientes de descargas de buques quimiqueros, la muestra es representativa de una operación típica de descarga de xileno y tolueno, las que estuvieron en reposo cuatro días antes de la toma de muestras.

Fig. 1 Fotografía de la Poza de Residuos Líquidos.

2) Reactivos: Se usó peróxido de hidrógeno, H_2O_2 al 30% v/v Q.P, sulfato ferroso $FeSO_4.7H_2O$ granular Mallinckrodt ACS y ácido sulfúrico H_2SO_4 concentrado USP.

3) Equipos: Se empleó una balanza analítica, potenciómetro y equipos para la determinación de la DQO (bloque digestor y espectrofotómetro UV-Vis) y la DBO_5 (Incubadora y medidor de oxígeno disuelto) y material de vidrio.

B. Caracterización del Agua Residual

Se caracterizó la muestra de agua residual midiendo el pH (APHA 4500-H+ B), conductividad eléctrica (APHA 2510 B), alcalinidad total (APHA 2320 B), DQO (APHA5220 D), DBO_5 (APHA 5210 B), VOC —Benceno, etilbenceno, m-xileno, o-xileno, p-xileno, tolueno— según EPA 8260.

C. Procedimiento Experimental

1) Cálculo de la Dosis de H_2O_2 al 30% v/v: Considerando la densidad del H_2O_2 igual a 1 g/mL y con masa molar igual a 34 g/mol. Como 1 g de DQO es igual a 1 g de O_2. Entonces, para 1 mL de H_2O_2 30% v/v, se tiene 0.3 mL H_2O_2 y como la densidad se considera 1 g/mL, se tendría 0.3 g de H_2O_2, entonces:

$$mol\ H_2O_2 = \frac{0.3g}{34g/mol} = 0.008823$$

$$Si: H_2O_2 \rightarrow H_2O + \frac{1}{2}O_2$$

$$mol\ O_2 = (0.008823)(0.5) = 0.004412$$

$$mg\ O_2 = (0.004412\ mol)(32\ g/mol)(1000\ mg/1g) = 141.2$$

Entonces:

$$H_2O_2(mL/L) = \frac{DQO(mgO_2/L)}{141.2(mgO_2/mL\ H_2O_2)} \quad (1)$$

2) Cálculo de la Dosis de $FeSO_4.7H_2O$ al 99.5%: Para el cálculo de la dosis del Sulfato ferroso heptahidratado, se consideró un rango molar de 1.6 hasta 62.5 para la relación H_2O_2/Fe^{2+}. En nuestro caso, hemos utilizado el concepto de que el peróxido de hidrógeno es el reactivo en exceso, mientras que el sulfato ferroso es el reactivo limitante.

3) Condiciones Operativas del Proceso Fenton: De la revisión bibliográfica [9], [14], [19], [20] se establece que las condiciones operativas del proceso Fenton serán: pH de 3.5, tiempo de contacto de 75 min (45 min de agitación y 30 min. de filtración/sedimentación), temperatura de 20 °C y la concentración inicial de la DQO de la muestra de agua residual.

4) Protocolo Experimental: Los experimentos se realizaron del siguiente modo:

a. Se midieron 250 mL de agua residual y se colocaron en un vaso de precipitados de 500 mL.

b. Se calibró el potenciómetro con soluciones estándar en el rango ácido y se midió el pH inicial de la muestra.

c. Se ajustó el pH a 3.5 agregando gota a gota ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4).

d. El procedimiento se repitió con diez alícuotas idénticas, cubriendo el rango de estudio.

e. A cada alícuota se añadió el volumen de peróxido de hidrógeno (H_2O_2, 30%) indicado en la Tabla II.

f. Se pesó la cantidad requerida de sulfato ferroso (según la Tabla II) y se agregó a la alícuota respectiva.

g. Se colocó una barra magnética de agitación en cada vaso con la alícuota a tratar.

h. Los vasos se pusieron sobre placas agitadoras y se mezclaron durante 45 minutos.

i. Después de la agitación, las muestras reposaron 30 minutos para permitir la precipitación del hierro.

j. Finalmente, se separó el sólido precipitado del agua tratada por decantación y filtración, y el líquido se guardó en frascos (ver Fig. 3) para su posterior análisis.

La eficiencia de la remoción de la materia orgánica (xileno y tolueno) se determina según:

$$\%Eficiencia\ \text{Re}moción = \left[1 - \frac{DQO_{final}}{DQO_{inicial}}\right].100 \quad (2)$$

Donde:

DQO_{final}: Demanda Química de Oxígeno al final del proceso Fenton (mg O_2/L)

$DQO_{inicial}$: Demanda Química de Oxígeno antes del proceso Fenton (mg O_2/L)

D. Aplicación Industrial

El sistema de descarga para los productos químicos que llegan al terminal multiboyas consiste en utilizar agua como medio de empuje para el desplazamiento de cada producto químico, dicho proceso presenta una "cabeza" y una "cola" durante la descarga, las cuales son las mezclas de la interfase agua-producto que se tiene en la tubería submarina de descarga. La "cabeza" y "cola" se reciben en tanques Dollys para ser posteriormente separados por diferencias de densidades. Por último, el agua que se separa irá a las pozas de residuos líquidos para iniciar su proceso de tratamiento. Un esquema del proceso se muestra en la Fig. 2.

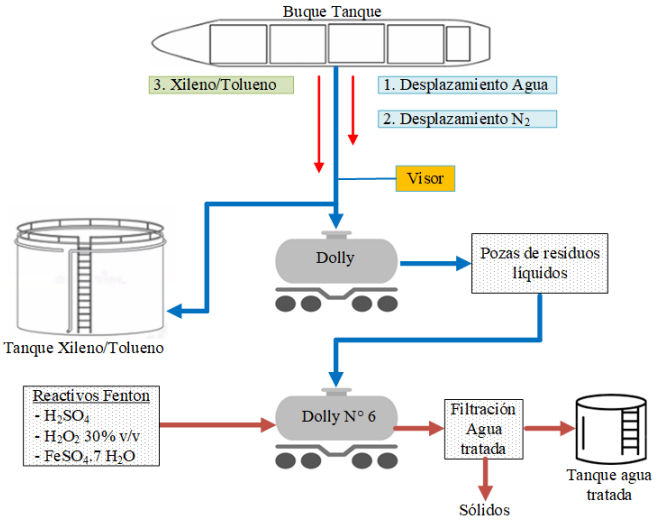

Fig. 2 Esquema del proceso de tratamiento de los efluentes líquidos aplicando el proceso Fenton para la remoción de xileno y tolueno.

1) Recepción de Efluentes Líquidos: El agua separada se envía a las pozas de residuos líquidos, luego se bombea hacia el tanque Dolly N° 6.

2) Ajuste pH: Se añadió H_2SO_4 concentrado para ajustar el pH a 3.5.

3) Dosificación y Mezcla del Reactivo Fenton: Se añade el reactivo Fenton según la dosificación que se obtiene en el Protocolo Experimental. Luego se empieza la mezcla de los compuestos a través de la recirculación dentro del tanque Dolly N° 6 por 45 minutos.

4) Filtración del Agua Tratada: Finalizado el tiempo de mezcla en el tanque Dolly N° 6, se dejó reposar por 30 minutos antes de proceder con la filtración del agua, con la ayuda del equipo de filtración. Se pasó el agua a través de las mangas filtrantes para ser posteriormente enviada al tanque de almacenamiento de agua tratada.

5) Almacenamiento de Agua Tratada: Finalmente, obtendremos el agua tratada por el proceso Fenton que se

almacenó en el tanque de almacenamiento donde se realizará el muestreo para enviarla al laboratorio y corroborar que los parámetros resultantes se encuentren dentro de lo permisible.

6) Residuos Sólidos: El sólido resultante de la filtración se dispone como residuo sólido no peligroso.

III. Resultados y Discusión

A. Caracterización del Agua Residual

En la Tabla I se presentan los resultados de la caracterización del agua residual. El agua muestra un ligero carácter ácido. La conductividad de 2282 µS/cm indica un agua moderadamente contaminada con una concentración significativa de sólidos disueltos. La relación DBO_5/DQO es igual a 0.46, una relación DBO_5/DQO baja (por ejemplo, <0.3) indica una baja biodegradabilidad [14]). En general, según las fuentes revisadas, la relación DBO_5/DQO es 0.14 para aguas oleosas de las refinerías de petróleo, lo que indica baja biodegradabilidad [20]. En [19] se reporta que en un efluente de refinería el contenido de xileno es de 31.54 mg/L y 39.83 mg/L para el tolueno y en esta investigación el contenido de xileno es de 11.1045 mg/L y 23.4870 mg/L el de tolueno. Estos compuestos son difíciles de degradar por los métodos convencionales de tratamiento de aguas y, por su naturaleza recalcitrante, pueden inhibir los procesos biológicos de depuración. Por ello, a menudo se requieren procesos avanzados de oxidación (PAO), como el proceso Fenton, para su degradación [14].

TABLA I
Resultado de la Caracterización del Agua Residual

Parámetro	Resultado
pH (unidades pH)	6.9
Conductividad (µS/cm)	2282
Alcalinidad Total (mg $CaCO_3$/L)	263
DQO (mg/L)	476
DBO_5 (mg/L)	220.3
Benceno (mg/L)	0.0178
Etilbenceno (mg/L)	1.5299
Xilenos (mg/L)	11.1045
Tolueno (mg/L)	23.4870

B. Resultados Experimentales

Se prepararon diez alícuotas en vasos de precipitados con la muestra de agua residual, como se aprecia en la Fig. 3. Primero se acidificó las muestras hasta pH 3.5 con H_2SO_4 concentrado, luego se le añadió el reactivo Fenton (H_2O_2 al 30% y $FeSO_4.7H_2O$) y se la sometió a agitación por 45 minutos después, del cual se lo dejó en reposo por 30 minutos y luego se filtró para retirar el sólido formado. Luego, en el agua tratada y filtrada se midió el contenido de DBO_5 y la DQO; los resultados se muestran en la Tabla II.

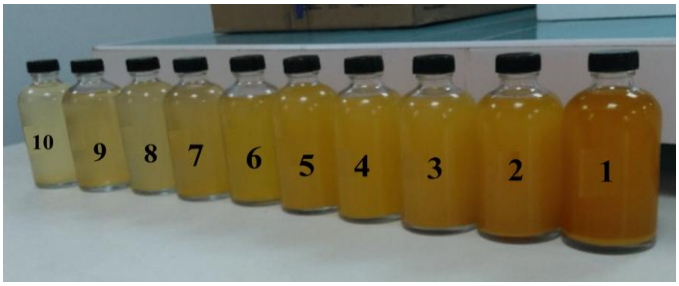

Fig. 3 Agua residual tratada con el reactivo Fenton.

TABLA II
Dosificación del Reactivo Fenton y Medición de la DBO_5 y la DQO

N° Muestra	Relación molar H_2O_2/Fe(II)	Dosis de H_2O_2 al 30% (ml)	Cantidad de $FeSO_4.7H_2O$ (g)	DBO_{5final} (mg/L)	DQO_{final} (mg/L)
1	1.6	0.8428	1.895	23.2	73
2	4.7	0.8428	0.632	20.6	56
3	7.9	0.8428	0.379	24.4	76
4	11.1	0.8428	0.271	17.6	39
5	15.9	0.8428	0.19	15.9	42
6	23.8	0.8428	0.126	16.2	39
7	31.3	0.8428	0.095	15.1	36
8	40.0	0.8428	0.076	15.6	36
9	47.6	0.8428	0.063	15.4	36
10	62.5	0.8428	0.047	285	667

En la Tabla III y Fig. 4 se presentan los resultados de la eficiencia de la remoción de xileno y tolueno. Esto se calculó empleando (2) y considerando la DQO y DBO_5 inicial del agua residual como se presentó en la Tabla I.

TABLA III
Eficiencia de la Remoción de la DBO_5 y la DQO

N° Muestra	Relación molar H_2O_2/Fe(II)	Remoción DBO_5 (%)	Remoción DQO (%)
1	1.6	89.47	84.66
2	4.7	90.65	88.24
3	7.9	88.92	84.03
4	11.1	92.01	91.81
5	15.9	92.78	91.18
6	23.8	92.65	91.81
7	31.3	93.15	92.44
8	40.0	92.92	92.44
9	47.6	93.01	92.44
10	62.5	-29.37	-40.13

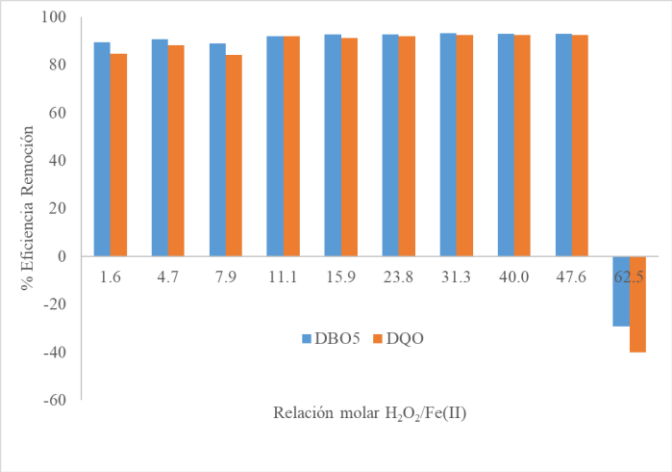

Fig. 4 Agua residual tratada con el reactivo Fenton.

Se aprecia en la Tabla IV y la Fig. 4 que la mayor Eficiencia de Remoción es de 92.44% con una relación H_2O_2/Fe(II) de 31.3 a mayores relaciones el porcentaje se mantiene y cuando la relación es de 62.5 la eficiencia de remoción se vuelve negativa, lo que indica que ya no está procediendo la reacción de Fenton. Según [21] y [22] cuando aumenta la concentración de H_2O_2 más allá de su valor óptimo, se presenta un impacto negativo debido a que el exceso de H_2O_2 actúa como un secuestrante del •OH y evita que el tolueno y xileno reaccionen con el reactivo Fenton.

En [19] y [20] se ha establecido que una relación H_2O_2/DQO de 2.8 es la adecuada para la biodegradabilidad del agua residual y que una relación H_2O_2/DQO de [6] da un porcentaje de remoción de la DQO del 76.5. En nuestro caso, la relación H_2O_2/DQO fue 2.88, con una eficiencia de remoción del 92.44%.

C. Aplicación Industrial

Basados en los resultados experimentales, se decidió realizar la aplicación industrial del agua residual en un terminal de almacenamiento de productos químicos (principalmente xileno/tolueno). En este terminal se producen dos descargas por mes. En cada descarga se adquieren 200 m³ de agua, de las cuales 70 m³ se usan para el empuje de los productos químicos, 50 m³ para el lavado interno de tuberías en el patio de tanques y 80 m³ para el lavado interno de la tubería submarina de descarga. Al final del proceso, 130 m³ del agua van hacia un tanque de almacenamiento, 35 m³ quedan almacenados en la tubería submarina y 35 m³ son el agua contaminada con trazas de xileno/tolueno y van hacia la Poza de Residuos Líquidos.

Las mejores condiciones experimentales fueron: Relación molar H_2O_2/Fe(II) de 2.88, pH de 3.5, tiempo de contacto de 45 minutos. En la Tabla IV se detalla la dosificación bajo esas condiciones para tratar 35 m³ de agua residual. Para la mezcla se empleó el tanque Dolly N° 6 y bombas de agua para recircular el agua y lograr el efecto de mezclado. Para la separación de los sólidos formados se emplearon mangas filtrantes para el equipo de filtración.

Finalmente, el agua así tratada se almacenó para su disposición final, pero previamente se tomaron muestras para verificar si el agua cumple con los LMP establecidos en el D.S. N° 037-2008-PCM de la legislación peruana [6]. los resultados se muestran en la Tabla V.

TABLA IV
CANTIDAD DE REACTIVOS PARA TRATAR EL AGUA RESIDUAL

Insumo Químico	Cantidad a Usar por c/Buque (kg)
Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2) 30%	129.78
Sulfato Ferroso Heptahidratado ($FeSO_4.7H_2O$)	13.26
Ácido Sulfúrico concentrado (H_2SO_4)	25.62

Los resultados mostrados en la Tabla V indican que el agua residual tratada con el proceso Fenton cumple con los LMP establecidos en el D.S. N° 037-2008-PCM de la legislación peruana [6]. El % de eficiencia de remoción de la DQO y la DBO5 para el tratamiento a escala industrial es 89.49% y 88.52% respectivamente. Estos resultados se asemejan a los obtenidos en la escala experimental de 92.44% y 93.15% respectivamente.

TABLA V
CARACTERIZACIÓN DEL AGUA TRATADA VS. LMP

Parámetro	Agua Residual Tratada con el Proceso Fenton	LMP (DS N° 037-2008-PCM)
Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH), mg/L	<0.010	20
Cloruros, mg/L	979.7	2000
Cromo Hexavalente, mg/L	<0.010	0.1
Cromo Total, mg/L	3.036	0.5
Mercurio, mg/L	<0.001	0.02
Cadmio, mg/L	<0.0001	0.1
Arsénico, mg/L	<0.002	0.2
Fenoles para Efluentes de Refinerías con FCC, mg/L	<0.0010	0.5
Sulfuros para Efluentes de Refinerías con FCC, mg/L	<0.020	1.0
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), mg/L	25.3	50
Demanda Química de Oxígeno (DQO), mg/L	51	250
Cloro Residual, mg/L	0.35	0.2
Nitrógeno Amoniacal, mg/L	<0.1	40
Coliformes Totales, NMP/100 mL	<1.8	<1000
Coliformes Fecales, NMP/100 mL	<1.8	<400
Fósforo, mg/L	<0.010	2.0
Bario, mg/L	<0.0002	5.0
Aceites y Grasas, mg/L	<0.48	20
Plomo, mg/L	<0.002	0.1

El agua residual y los sólidos que quedan después del tratamiento fueron dispuestos por una empresa prestadora de residuos previa neutralización del agua.

IV. Conclusiones

Se evaluó la eficacia del proceso Fenton para el tratamiento de un agua residual real contaminada con xileno y tolueno, con el objetivo de determinar su viabilidad a escala industrial.

A escala de laboratorio, se alcanzó una eficiencia de remoción del 92.44% para la DQO y del 93.15% para la DBO_5, empleando una relación molar H_2O_2/Fe^{2+} de 31.3, un pH de 3.5, un tiempo de reacción de 45 minutos y 30 minutos de sedimentación, seguidos de filtración para separar los sólidos generados.

Con base en estos resultados, el proceso se escaló a nivel industrial tratando 35 m^3 de agua residual. Se obtuvo una eficiencia de remoción del 89.49% para la DQO y del 88.52% para la DBO_5. El efluente tratado cumplió con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en el D.S. N° 037-2008-PCM, registrando concentraciones de DQO y DBO_5 significativamente inferiores a los límites establecidos.

Los resultados confirman que el proceso Fenton es una alternativa técnicamente viable para el tratamiento de aguas residuales que contienen compuestos orgánicos aromáticos como xileno y tolueno.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica de la Universidad Nacional de Ingeniería por el apoyo brindado para el desarrollo del proyecto.

Referencias

[1] Medline Plus, "Intoxicación con tolueno y xileno," Medline Plus. Accessed: May 09, 2025. [Online]. Available: https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/002829.htm

[2] ATSDR, "Resumen de salud pública xileno," ATSDR. Accessed: May 09, 2025. [Online]. Available: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs71.pdf

[3] C. Rodríguez-Padilla, "Intoxicación por tolueno," *Med. Leg. Costa Rica*, vol. 37, no. 2, pp. 53–62, Sep. 2020, Accessed: May 09, 2025. [Online]. Available: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S1409-00152020000200053&script=sci_abstract&tlng=es

[4] TRALSA, "Procedimiento para la descarga de producto de buque tanque," Lima, 2015.

[5] Institute Chemical Distribution, *Bulk liquid chemical handling guide for plants, terminals, storage and distribution depots (BLCH Guide)*. Witherby Seamanship International Ltd, 2012. Accessed: May 09, 2025. [Online]. Available: https://shop.witherbys.com/bulk-liquid-chemical-handling-guide-for-plants-terminals-storage-and-distribution-depots-blch-guide/#:~:text=Detailed Overview,safe and efficient operational performance.

[6] PCM, *Establecen límites máximos permisibles de efluentes líquidos para el subsector hidrocarburos*. Perú: El Peruano, 2008, pp. 1–2. Accessed: May 09, 2025. [Online]. Available: https://sinia.minam.gob.pe/normas/limites-maximos-permisibles-lmp-efluentes-liquidos-sub-sector

[7] M. Taco Ugsha and E. Mayorga LLerena, "Aplicación del proceso Fenton en la disminución de materia orgánica en aguas residuales de la industria termoeléctrica," *Química Cent.*, vol. 3, no. 1, pp. 25–30, Aug. 2017, doi: 10.29166/quimica.v3i1.1199.

[8] M. Pimentel Prates *et al.*, "Fenton: A systematic review of its application in wastewater treatment," *Processes*, vol. 11, no. 8, Aug. 2023, doi: 10.3390/pr11082466.

[9] I. H. Ahmed, A. A. Hassan, and H. K. Sultan, "Study of electro-Fenton oxidation for the removal of oil content in refinery wastewater," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1090, no. 1, p. 012005, Mar. 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1090/1/012005.

[10] M. H. Zhang, H. Dong, L. Zhao, D. xi Wang, and D. Meng, "A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective," *Sci. Total Environ.*, vol. 670, pp. 110–121, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.180.

[11] Y. Lin, J. Qiao, Y. Sun, and H. Dong, "The profound review of Fenton process: What's the next step?," *J. Environ. Sci. (China)*, vol. 147, pp. 114–130, 2025, doi: 10.1016/j.jes.2023.10.005.

[12] A. I. Merchant, A. H. Vakili, A. Kocaman, and S. S. Abu Amr, "New advancement of advanced oxidation processes for the treatment of petroleum wastewater," *Desalin. Water Treat.*, vol. 319, no. June, p. 10, 2024, doi: 10.1016/j.dwt.2024.100565.

[13] G. Terán, P. Posligua, and C. Banchón, "Dosificación mínima del reactivo Fenton para la remediación de agua contaminada con colorantes," *Enfoque UTE*, vol. 6, no. 3, pp. 65–80, 2015, doi: 10.29019/enfoqueute.v6n3.70.

[14] A. Rubio-Clemente, E. L. Chica, and G. A. Peñuela, "Application of Fenton process for treating petrochemical wastewater," *Ing. y Compet.*, vol. 16, no. 2, pp. 211–223, 2014, doi: https://doi.org/10.25100/iyc.v16i2.3696.

[15] M. J. Nasir, Z. F. Kadhum, N. O. Kariem, and Z. M. Jasim, "Removal of Sesame oil from artificial wastewater applying Fenton process and comparing it with actual wastewater," *J. Ecol. Eng.*, vol. 23, no. 10, pp. 248–254, 2022, doi: 10.12911/22998993/152518.

[16] M. Aiyd Jasim and F. Y. AlJaberi, "Investigation of oil content removal performance in real oily wastewater treatment by electrocoagulation technology: RSM design approach," *Results Eng.*, vol. 18, no. January, p. 101082, 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101082.

[17] M. Xu, C. Wu, and Y. Zhou, "Advancements in the Fenton process for wastewater treatment," in *Advanced Oxidation Process - Applications, Trends, and Prospects*, C. Bustillo-Lecompte, Ed., IntechOpen, 2020. doi: 10.5772/intechopen.90256.

[18] L. Yu, M. Han, and F. He, "A review of treating oily wastewater," *Arab. J. Chem.*, vol. 10, pp. S1913–S1922, 2017, doi: 10.1016/j.arabjc.2013.07.020.

[19] S. Ishak and A. Malakahmad, "Optimization of Fenton process for refinery wastewater biodegradability augmentation," *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 30, no. 5, pp. 1083–1090, 2013, doi: 10.1007/s11814-013-0002-2.

[20] B. H. Diya'uddeen, S. Rahim Pouran, A. R. Abdul Aziz, S. M. Nashwan, W. M. A. Wan Daud, and M. G. Shaaban, "Hybrid of Fenton and sequencing batch reactor for petroleum refinery wastewater treatment," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 25, pp. 186–191, 2015, doi: 10.1016/j.jiec.2014.10.033.

[21] C. F. Bustillo-Lecompte, D. Kakar, and M. Mehrvar, "Photochemical treatment of benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes (BTEX) in aqueous solutions using advanced oxidation processes: Towards a cleaner production in the petroleum refining and petrochemical industries," *J. Clean. Prod.*, vol. 186, pp. 609–617, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.135.

[22] A. Rubio-Clemente, E. Chica, and G. A. Peñuela, "Petrochemical wastewater treatment by photo-fenton process," *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 226, no. 3, 2015, doi: 10.1007/s11270-015-2321-x.