

Optimización del proceso Foto-Fenton para tratamiento de colorantes industriales

Alfredo Yamil Cano Jorge¹, Gerardo Isaac Meza Hernández¹, Adriana Benitez Rico²

¹ Universidad La Salle México, Facultad de Ciencias, Químicas, Ciudad de México

² Universidad La Salle México, Vicerrectoría de Investigación, Ciudad de México

alfredocano@lasallistas.org.mx; gerardo.meza@lasallistas.org.mx;
adriana.benitez@lasalle.mx

Resumen. El presente trabajo se enfocó en la optimización del proceso foto-Fenton heterogéneo para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con el colorante industrial rojo directo 28 (RD-28). Se empleó un catalizador magnético sólido en combinación con peróxido de hidrógeno y luz ultravioleta para generar radicales libres responsables de la degradación del contaminante. Se estudió el efecto del pH en la eficiencia del proceso, observando que condiciones ácidas (pH 4) favorecen una mayor degradación, alcanzando casi el 100%. Además, se aplicó la técnica de scavenger test para identificar y determinar el papel de los radicales libres en la reacción, destacando la predominancia del radical hidroxilo (-OH) en el mecanismo de oxidación. Estos resultados aportan información relevante para la optimización y escalabilidad del proceso, contribuyendo al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible número 6, que busca asegurar agua limpia y saneamiento.

Palabras Clave: Foto-Fenton, degradación de colorantes, radicales libres.

1 Descripción de la problemática prioritaria abordada

El uso de colorantes es fundamental en diversas industrias, como la textil, ya que mejoran la apariencia de los productos, haciéndolos más atractivos para los consumidores. Sin embargo, el proceso de teñido genera residuos que se liberan como aguas residuales contaminadas. Estas aguas contienen compuestos coloreados que representan un desafío ambiental importante debido a su alta estabilidad y toxicidad. Esto se puede corroborar de acuerdo con los trabajos de los autores Delia Teresa Sponza y Mustafa Isik, así como Jim E. Riviere, donde hablan sobre la toxicidad de este colorante y efectos cutáneos que provoca. En este proyecto, se aborda el tratamiento de aguas residuales contaminadas con uno de los colorantes utilizados en la industria: el rojo directo 28 (RD-28). Esto contribuye al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 6, que busca garantizar agua limpia y saneamiento para todos. Específicamente se busca cumplir con la meta 6.3, que comprende el mejorar la calidad del agua al reducir la contaminación y emisiones de productos químicos, así como eliminar el vertimiento de estos. Se tiene en cuenta también el indicador 6.3.1, que se enfoca en el tratamiento adecuado de aguas residuales domésticas e industriales.

El estudio para la degradación de este colorante puede representar muchos impactos positivos en la vida cotidiana, ya que este es un colorante muy utilizado en diversas industrias, como la textil, agrícola, hospitalaria, de fármacos, entre otras. El desarrollo para el tratamiento y degradación de este colorante en las aguas residuales puede aplicarse durante el tratamiento secundario y postratamientos dentro de un tren de tratamientos de aguas residuales donde se encuentran diversos contaminantes químicos, como lo son los fármacos, tensoactivos, plaguicidas, cosméticos, drogas, entre otros contaminantes. Cabe mencionar que este colorante es un contaminante emergente que aún no está normado, por lo cual, el profundizar sobre su tratamiento, degradación, y desecho promueve la generación de un proceso adecuado para este.

Para tratar estas aguas contaminadas, el método empleado es el proceso foto-Fenton heterogéneo, una técnica de oxidación avanzada que requiere la presencia de un catalizador, peróxido

de hidrógeno (H_2O_2) y luz ultravioleta (UV) para generar radicales libres capaces de degradar compuestos orgánicos como los colorantes. En este estudio, se utilizó un catalizador con propiedades magnéticas, permitiendo una mayor eficiencia en la recuperación y reutilización del mismo. Además, esta estrategia favorece la aplicabilidad del proceso a escala industrial por practicidad.

En este trabajo presentamos la optimización de la degradación del colorante rojo directo 28, mediante el proceso foto-Fenton heterogéneo, evaluando cómo las variaciones de pH de la solución afectan la eficiencia del proceso, con el objetivo de maximizar la eliminación del colorante y contribuir en la mejora del tratamiento de aguas residuales en escenarios industriales.

Adicionalmente, se estudia la técnica conocida como scavenger test, utilizada para identificar y determinar el papel de los distintos radicales libres generados durante la reacción. Este método consiste en añadir compuestos específicos, denominados agentes "captadores" o "scavengers", que reaccionan selectivamente con radicales libres como el radical hidroxilo ($-OH\cdot$), superóxido ($-O_2\cdot$) o radicales peróxidos, para observar cómo la adición de cada agente afecta la degradación del colorante. De este modo, el scavenger test aporta información fundamental para optimizar el proceso y comprender la base del mecanismo de reacción para la remoción del contaminante.

2 Objetivo

Optimizar el proceso foto-Fenton para el tratamiento de aguas residuales con colorante RD-28, utilizando catalizadores magnéticos, así como la determinación de los radicales libres que intervienen en dicho proceso.

3 Propuesta teórico-metodológica

El proceso foto-Fenton heterogéneo se llevó a cabo utilizando un catalizador sólido magnético proporcionado por el grupo de investigación de Ingeniería de Procesos y Nuevos Materiales (Universidad La Salle, México). Este catalizador contiene iones Fe^{2+} y Fe^{3+} en su estructura, esenciales para la generación de radicales libres en el proceso foto-Fenton. A continuación, se describen los pasos seguidos para el desarrollo experimental del proceso:

Se prepararon soluciones contaminadas con el colorante rojo directo 28 (RD-28) con una concentración de 60 ppm en diferentes condiciones de pH: ácido (pH 4), neutro y básico (pH 10). El pH fue ajustado y medido antes y después del tratamiento para evaluar su influencia en la degradación. Se añadió al sistema el catalizador magnético sólido junto con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en cantidades controladas para iniciar el proceso foto-Fenton. Las muestras fueron expuestas a luz UV para activar el proceso foto-Fenton y favorecer la generación de radicales libres responsables de la oxidación del colorante. Se tomaron alícuotas de la solución en intervalos de 30 minutos durante el tratamiento para medir la absorbancia del colorante mediante espectrofotometría UV-Vis. Esto permitió obtener datos para analizar la cinética de degradación bajo distintas condiciones. Para identificar los radicales libres implicados en la reacción, se añadió a diferentes muestras ciertos compuestos scavengers específicos: dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), metanol y alcohol isopropílico. Cada uno reaccionó selectivamente con radicales como hidroxilo, superóxido y peróxido, y se evaluó el impacto en el porcentaje de degradación del RD-28 comparando con una muestra control sin scavengers.

4 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos muestran que el pH de la solución tiene un impacto significativo en la eficiencia del proceso foto-Fenton heterogéneo para la degradación del colorante rojo directo 28 (RD-28). Se observó una mayor eficiencia de degradación a un pH ácido (pH 4), alcanzando aproximadamente el 100 % de degradación en 2 horas. A medida que el pH aumenta hacia valores neutros se logra un 80% y en alcalinos, la eficiencia decrece notablemente a una degradación nula a pH 10.

Además, el pH ácido favorece la estabilidad y generación de estos radicales hidroxilos, que son las especies reactivas con mayor capacidad para romper las estructuras moleculares complejas del RD-28.

Al realizar el scavenger con diferentes especies, se encontró el que el porcentaje de degradación del colorante fue mayor en presencia del alcohol isopropílico. Este compuesto es responsable de la formación de radicales hidroxilos, con lo que se determinó que estos radicales son los mejores para la degradación del RD-28. Este análisis a través del scavenger test confirma que el mecanismo principal de degradación del colorante en el proceso foto-Fenton heterogéneo se basa en la generación y acción del radical hidroxilo.

5 Conclusiones y perspectivas futuras

En conclusión, se observó que el pH acido es la mejor condición para la degradación del colorante, ya que hay mayor presencia de radicales hidroxilos, los cuales son los responsables de dicha degradación, de acuerdo con el scavenger test. Como trabajo futuro se tiene la posibilidad de escalar el proceso a un volumen más grande, agregar otro tipo de contaminantes a la mezcla y ver como estos afectan la degradación (un sistema más real).

4 Agradecimientos

Al financiamiento del proyecto NEC 20-23 de la Vicerrectoría de Investigación, Universidad La Salle México.

5 Referencias

1. Mal Soufi, Hind Hajjaoui, Rachid Elmoubarki, Mohamed Abdennouri, Samir Qourzal, Noureddine Barka (2021) Spinel ferrites nanoparticles: Synthesis methods and application in heterogeneous Fenton oxidation of organic pollutants – A review, *Applied Surface Science Advances*, (6), 100145.
2. Hincapié-Mejía, Gina M, Ocampo, David, Restrepo, Gloria M, & Marín, Juan M. (2011). Fotocatálisis Heterogénea y Foto-Fenton Aplicadas al Tratamiento de Aguas de Lavado de la Producción de Biodiesel. *Información tecnológica*, 22(2), 33-42.
3. Ardila Arias, Alba Nelly, Arriola, Erasmo, Reyes Calle, Juliana, Berrio Mesa, Eliana, & Fuentes Zurita, Gustavo. (2016). Mineralización de etilenglicol por foto-Fenton asistido con ferrioxalato. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(2), 213-226.
4. Sponza, D. T., & Işık, M. (2004). Toxicity and intermediates of C.I. Direct Red 28 dye through sequential anaerobic/aerobic treatment. *Process Biochemistry*, 39(10), 1437-1444. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00265-4](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00265-4)
5. Riviere, J. E. (1999). Comparative cutaneous toxicology: Evaluation of chemical mixture effects in a porcine bioassay. *Toxicological Sciences*, 49(2), 155–165. <https://doi.org/10.1093/toxsci/49.2.155a>.

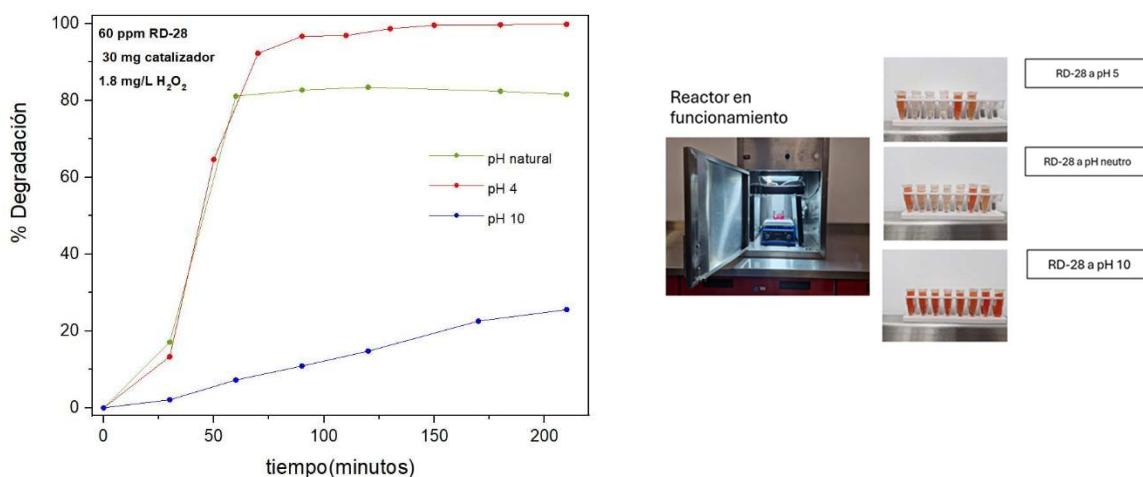


Figura 1. Izq, gráfica de degradación de contaminante en función del pH, derecha reactor en funcionamiento y alícuotas los tratamientos en diferentes condiciones.

