

Tratamiento de Aguas Residuales mediante el Reactivo de Fenton

Samuel Romero Guerrero

Resumen—Tratamiento de aguas residuales, contaminadas por compuestos orgánicos persistentes, mediante el uso del Reactivo de Fenton.

Palabras Claves—Aguas residuales, Fenton, Tratamiento, Catalizador.

1. INTRODUCCIÓN

EN la última mitad del siglo XX, el acelerado crecimiento demográfico, el desarrollo de la industria, la intensificación en el uso de los recursos naturales y los requerimientos energéticos, han propiciado una grave problemática en lo referente a la contaminación del agua.

Las aguas residuales contienen una amplia variedad de contaminantes, incluidos compuestos orgánicos. Estos contaminantes pueden ser perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana si no se tratan adecuadamente. Por lo tanto, es crucial desarrollar métodos efectivos de tratamiento de aguas residuales.

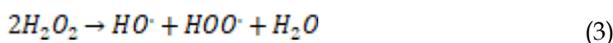
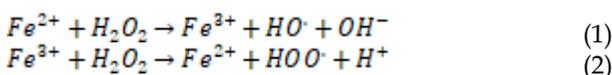
La industria genera aguas residuales que en ocasiones no pueden ser tratadas por procesos convencionales debido a la alta toxicidad, por lo que se han buscado alternativas que puedan dar solución a este problema [1].

2. REACTIVO DE FENTON: PRINCIPIOS BÁSICOS

Recientemente se ha ido incrementando el interés en los procesos de oxidación avanzada (POAs) como métodos eficientes en el tratamiento de contaminantes. Estos procesos son amigables con el medio ambiente y los métodos tanto químicos, fotoquímicos y electroquímicos, comparten el mismo principio, la generación de radicales hidroxilos como su principal agente oxidantes [2].

El reactivo de Fenton es una solución de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y un catalizador de hierro (típicamente sulfato de hierro (II), $FeSO_4$) [3]. Fue desarrollado en la década de 1890 por Henry John Horstman Fenton [3].

El hierro (II) se oxida mediante el peróxido de hidrógeno a hierro (III), formando un radical hidroxilo y un ión hidróxido en el proceso. Luego, mediante otra molécula de peróxido de hidrógeno, formando un radical hidroperoxilo, se reduce de nuevo a hierro (II).



Los radicales libres generados por este proceso participan en reacciones secundarias. Por ejemplo, el radical hidroxilo es un oxidante potente y no selectivo [4].

La reacción (1) fue sugerida por Haber y Weiss en la década de 1930 como parte de lo que se convertiría en la reacción de Haber-Weiss [5].

2.1. Efecto del pH sobre la formación de radicales libres

El pH afecta considerablemente a la velocidad de reacción debido a una variedad de razones. A un pH bajo, se produce la complejación del hierro (II), $[Fe(H_2O)_6]^{2+}$, por lo que hay una menor disponibilidad del catalizador, lo que conlleva a una reducción de la velocidad de reacción [6]. También se produce una eliminación de los radicales hidroxilos debido al exceso de protones.

A pH elevados, la reacción se ralentiza debido a la precipitación de $Fe(OH)_3$. También, en estas condiciones, la estabilidad del peróxido de hidrógeno se ve afectada, provocando su autodescomposición [6]. Y aparte, se observa una disminución del potencial redox del radical hidroxilo, reduciendo su eficacia [6].

Por lo tanto, el pH juega un papel crucial en la formación de radicales libres, y por tanto, en el rendimiento de la reacción. En general, las velocidades de las reacciones tienden a ser máxima a un intervalo de pH 2,5-2,8 [7].

3. PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADA (POAs)

Una gran cantidad de estudios sobre el tratamiento de aguas residuales se centran en la oxidación de los contaminantes orgánicos presentes en el agua. Los POAs son procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes.

Estos procesos involucran la generación y uso de especies transitorias poderosas, fundamentalmente el radical

hidroxilo, una especie de gran poder oxidante debido a su potencial redox, sólo superado por el del flúor.

Especie	Potencial
Flúor	3,03
Radical hidroxilo	2,80
Oxígeno atómico	2,42
Ozono	2,07
Peróxido de hidrógeno	1,78
Radical perhidroxilo	1,70
Permanganato	1,68
Ácido hipobromoso	1,59
Dióxido de cloro	1,57
Ácido hipocloroso	1,49
Cloro	1,36
Bromo	1,09
Yodo	0,54

Tabla 1. Potenciales redox de algunos agentes oxidantes

3.1. Mecanismos de reacción

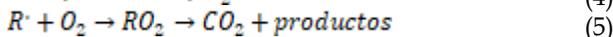
La característica fundamental que presentan los radicales hidroxilos es su baja selectividad, lo que supone una propiedad muy importante para su utilización en el tratamiento de aguas residuales. Aunque esto puede convertirse en un inconveniente porque a veces los radicales reaccionan con especies no contaminantes presentes en las aguas, como bicarbonatos o materia orgánica natural en disolución [8].

Hay una gran variedad de contaminantes que pueden ser degradados mediante estos procesos [9]:

- Productos farmacéuticos y veterinarios.
- Desinfectantes y biocidas.
- Drogas de abuso.
- Productos del cuidado personal.
- Sustancias químicas de origen industrial.
- Aditivos alimenticios.
- Subproductos de desinfección de aguas.
- Nanomateriales.
- Microorganismos patógenos.
- Toxinas biológicas.

Los radicales hidroxilo pueden actuar de tres tipos de ataque inicial:

1. Abstracción de un átomo de hidrógeno por parte del radical hidroxilo, formando agua:



Muy típico para la destrucción de compuestos tipo alcanos y alcoholes.

2. Adición electrofílica a un doble enlace:



Se suele dar en olefinas y compuestos aromáticos. Dentro de los aromáticos los que presentan grupos activantes reaccionan más rápido que los que presentan grupos desactivantes, y los monosustituídos lo hacen con mayor rapidez que los polisustituídos [8].

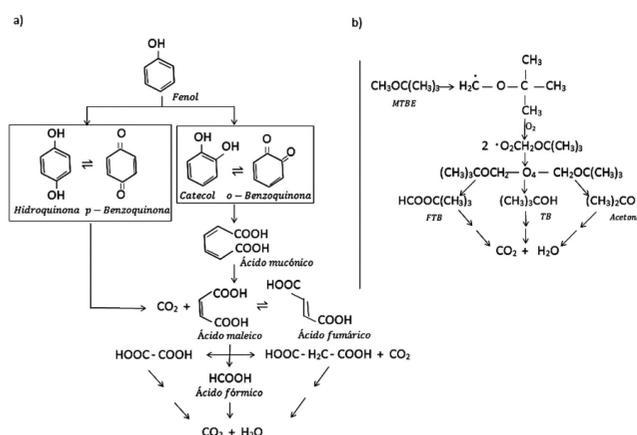


Fig 1. Degradación de fenol mediante radical hidroxilo (a) y del metil ter-butil éter (b) [10]

3. Transferencia electrofílica:



La formación de intermedios durante la degradación es un aspecto que depende de muchos factores: el número de radicales hidroxilo y la presencia de otros radicales, la cantidad de agentes secuestradores de radicales, la concentración de contaminante y de iones de hierro (II) o hierro (III).

3.2. Ventajas e inconvenientes del proceso

El proceso Fenton está considerado como un tratamiento muy prometedor para la regeneración de aguas residuales.

En la tabla 2 se muestran las principales ventajas e inconvenientes de este proceso:

Ventajas	Inconvenientes
El Fe (II) es muy abundante, no es tóxico y es muy seguro.	Cuando el proceso finaliza es necesaria una etapa de neutralización para separar el hierro, generando un lodo que se ha de gestionar adecuadamente.
El peróxido de hidrógeno es fácil de manejar y ambientalmente benigno.	El peróxido de hidrógeno es un compuesto bastante más caro que el Fe (II) y es el principal causante del coste final del tratamiento.
No se forman compuestos clorados nocivos como en otras técnicas oxidativas.	El proceso Fenton no es capaz de lograr una mineralización completa de todos los contaminantes orgánicos, pero sí un incremento de la biodegradabilidad.
No existen limitaciones de transferencia de masa por tratarse de un sistema homogéneo.	El proceso requiere un estricto control del pH.
El diseño de reactores para la aplicación tecnológica es bastante sencillo.	

Tabla 2. Ventajas e inconvenientes del proceso Fenton

4. CONCLUSIONES

Los efluentes procedentes de la industria son muy variados y presentan una alta cantidad de compuestos tóxicos, persistentes y difíciles de degradar por procesos convencionales. Por lo tanto, se hace necesario el empleo de tecnologías más eficientes.

En este sentido, el proceso de oxidación Fenton puede ser considerado como una técnica atractiva en el tratamiento de este tipo de aguas residuales. Sin embargo, las aguas residuales presentan una gran variabilidad de compuestos, por lo que resulta bastante complejo optimizar el proceso Fenton a escala industrial. Hoy en día existen varios laboratorios que estudian variables de este tipo de proceso para poder conseguir grandes rendimientos. El proceso foto-Fenton es un ejemplo de esto.

No obstante, el acoplamiento de estos sistemas avanzados de oxidación como pretratamiento a procesos biológicos convencionales se posiciona como una alternativa económicamente viable para la remoción de contaminantes tóxicos y persistentes.

REFERENCIAS

- [1] Pliego G, Zazo JA, Blasco S, Casas JA, Rodríguez JJ (2012) Treatment of Highly Polluted Hazardous Industrial Wastewaters by Combined Coagulation-Adsorption and High-Temperature Fenton Oxidation. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 51 (7).
- [2] David FO (1993) Comparative Aspects of Advanced Oxidation Processes. In: *Emerging Technologies in Hazardous Waste Management III*, vol 518. ACS Symposium Series, vol 518. American Chemical Society.
- [3] Koppol, WH (1 de diciembre de 1993). "El centenario de la reacción de Fenton". *Biología y Medicina de los Radicales Libres*.

- [4] Cai, QQ; Jothinathan, L; Deng, SH; Ong, SL; Ng, HY; Hu, JY (2021). "Procesos AOP basados en Fenton y ozono para el tratamiento de efluentes industriales". *Procesos avanzados de Oxidación para Plantas de Tratamiento de Efluentes*".
- [5] Koppopenol, WH. (2001). "El ciclo de Haber-Weiss-70 años después".
- [6] Tang, WZ; Huang, CP (1 de diciembre de 1996). "Cinética de oxidación de 2,4-diclorofenol por reactivo de Fenton". *Tecnología Ambiental*.
- [7] Pignatello et al. 2006, Neyens et al. 2003
- [8] Aliaga, S. "Aplicación del Proceso Fenton y Coagulación - Flocculación para la Regeneración de Aguas Depuradas" (2010).
- [9] Bernad, G. "Oxidación de contaminantes orgánicos mediante procesos pseudo-Fenton con óxidos de hierro" (2018).
- [10] Rubio, A.; Edwin, L.; Gustavo, A. "Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico" (2014).



Samuel Romero Guerrero, cuarto curso, Grado en Química.